

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Mecànica

INFLUÈNCIA DE LA MIDA DE LA MOSTRA EN L'AVALUACIÓ PROBABILISTA D'EDIFICIS DE MAÇONERIA NO REFORÇADA



Memòria

Autor: Patricia Arias Cañizares
Director: Jorge Arturo Avila-Haro
Convocatòria: Gener 2020

Resum

Els edificis de maçoneria no-reforçada representen un alt percentatge del parc urbà de diverses ciutats com és Barcelona. Actualment aquest tipus d'estructures es troben en contacte directe amb noves estructures de diferent tipus. És per això que és imprescindible determinar el seu comportament estructural amb la finalitat d'avaluar la interacció d'aquests edificis amb les noves estructures i el seu comportament davant fenòmens com els sismes.

Mitjançant metodologies simplifiades s'obtindran una sèrie de paràmetres representatius que ens permetran determinar la capacitat de l'estructura, que és un dels elements claus que, juntament amb la demanda sísmica, ens permetrien obtenir el desenvolupament de l'estructura davant la demanda.

En aquest treball es compararan diversos mètodes simplifiats per tal d'avaluar la capacitat de l'estructura i dels quals es selecciona el denominat com a el mètode N2 per a realitzar l'estudi de capacitat. Diverses propietats mecàniques materials (f_m , E , G , τ_0) s'han seleccionat de manera curosa com a variables aleatòries, representant la variabilitat d'aquest tipus d'edificis, fins a aconseguir una població de 1000 models estructurals. Amb aquest procés s'obtenen les corbes de capacitat de cada model.

A través de la selecció d'una mostra suficientment representativa de la població inicial, s'estableixen relacions y comparatives entre els diferents resultats per tal d'establir la validesa en la utilització de la mostra a manera d'estalviar en recursos de temps i càlcul.

Finalment, es presenta un anàlisi de la influència en els diversos resultats de diferents propietats mecàniques materials utilitzades com a variables aleatòries en l'estudi.

Resumen

Los edificios de mampostería no-reforzada representan un alto porcentaje del parque urbano de diversas ciudades como es Barcelona. Actualmente ese tipo de estructuras se encuentran en contacto directo con nuevas estructuras de diferentes tipos. Es por esto por lo que es imprescindible determinar su comportamiento estructural con la finalidad de evaluar la interacción de éstos con las nuevas estructuras y su comportamiento frente a fenómenos como los sismos.

Mediante metodologías simplificadas se obtendrán una serie de parámetros representativos que nos permitirán determinar la capacidad de la estructura, que es uno de los elementos clave que, juntamente con la demanda sísmica, nos permitirían obtener el desarrollo sísmico de la estructura frente a la demanda.

En este trabajo se comparan varios métodos simplificados por tal de evaluar la capacidad de la estructura y de los cuales se selecciona el denominado como el método N2 para realizar el estudio de capacidad. Varias propiedades mecánicas materiales (f_m , E , G , τ_0) se han seleccionado de manera cuidadosa como variables aleatorias, representando la variabilidad de este tipo de edificios, hasta conseguir una población de 1000 modelos estructurados. Con este proceso se obtienen las curvas de capacidad de cada modelo.

A través de la selección de una muestra suficientemente representativa de la población inicial, se establecen relaciones y comparativas entre los diferentes tipos de resultados por tal de establecer validez en la utilización de la muestra a manera de ahorrar en recursos de tiempo y cómputo.

Finalmente, se presenta un análisis de la influencia en los diversos resultados de diferentes propiedades mecánicas materiales utilizadas como variables aleatorias en el estudio.

Abstract

Masonry buildings represents a high percentage of the urban park of some cities as Barcelona. Actually, this kind of buildings are in direct contact with new types of structures. This is why it is essential to determinate its structural behavior in order to evaluate the interaction between them and the building behavior in front of earthquakes.

Using simplified methodologies, a set of representative parameters which allow us to determine de capacity of the structure, are obtained and together de seismic demand, will let us obtaining de development of the structure in front of the demand.

In this study, some simplified methods will be compared in order to evaluate the capacity of the structure, choosing the N" method to perform the capability study. Some mechanical properties (f_m , E , G , τ_0) are accurately selected as random variables, representing the variability of this kind of buildings, until getting a population of 1000 structural models. With this process we obtain the capability curves of each model.

By using the selection of a sample sufficiently representative of the initial population, relations and comparatives are set between the different results in order to establish la truth in the utilization of the sample to save sources of time and calculation.

Finally, we present the analysis of the influence in the different results of the different mechanical material properties used as random variables in the study.

Agraïments

En primer lloc, m'agradaria agrair a tots aquells que he anat trobant durant el grau, i en especial, a aquells que han resultat en amics i m'han fet costat durant tot el camí i durant el Treball de Fi de Grau, a la meva parella, qui ha estat pacient i m'ha fet costat, i als meus companys de feina durant els últims mesos per la seva motivació constant.

Agrair a la meva família, sobretot al meu pare i la meva mare, els quals m'han recolzat incondicionalment a la vida i a cursar aquests estudis i motivat en tot des del primer moment, fent possible la realització d'aquest treball.

I per acabar, agrair al meu tutor, Jorge Avila, per donar-me l'oportunitat d'emprendre aquest treball, per compartir el seu coneixement i per tota la seva paciència i ajuda durant el mateix.

Gràcies,

Glossari

Glossari d'abreviacions

Abreviació	Descripció
MSK-64	Escala d'intensitat macrosísmica Medvédev-Sponheuer-Kárník
NCSE-02	Norma de Construcció Sismoterrestre
EMS-98	Escala Macrosísmica Europea
NPD	Paràmetres de determinació nacional
CSM	<i>Capacity Specgtrum Metjod</i>
N2	Mètode estàtic no-lineal
MDOF	<i>Multiple Degree of Freedom</i>
SDOF	<i>Single Degree of Freedom</i>
AD	Acceleració-desplaçament
ADRS	<i>Acceleration Displacement Response Spectra</i>
SRS	<i>Simple Random Sampling</i>
FPC	Factor de correcció de la població
DS	<i>Damage States</i>
IM	<i>Intensity measure</i>

Glossari de símbols

Abreviació	Unitats	Descripció
a_b	cm/s^2	Acceleració sísmica bàsica
K	-	Coeficient de contribució
a	cm/s^2	Acceleració horitzontal
I		Intensitat MSK
S_a	g	Espectre de resposta elàstica
T	s	Període d'oscil·lació
C	-	Coeficient del terreny
T_A	s	Període Característic de l'espectre
T_B	s	Període Característic de l'espectre
T_C	s	Període Característic del terreny
ρ	-	Factor de risc
S	-	Coeficient d'ampliació
S_{a_e}	g	Acceleració espectral per comportament elàstic
S_{d_e}	cm	Desplaçament per comportament elàstic
μ_p	-	Factor de ductilitat
R_μ	-	Factor de conversió de l'espectre de demanda
P	N	Vector de càrregues laterals
M	-	Matriu diagonal de masses
p	N	Magnitud de les càrregues laterals
ψ	Adimensional	Distribució de càrregues laterals
ϕ	Adimensional	Vector de forma del desplaçament assumit
\ddot{U}	cm	Vector de desplaçaments
R	N	Vector de forces internes
D_{roof}	cm	Desplaçament al sostre
V_{base}	N	Tallant a la base

D^*	cm	Desplaçament equivalent del sostre del SDOF
F^*	N	Força equivalent del SDOF
Γ	-	Constant de transformació.
T^*	s	Període elàstic
F_y^*	N	Força de plastificació del sistema bilineal
D_y^*	cm	Desplaçament de plastificació del sistema bilineal
τ	N/cm ²	Resistència a tallant
G	N/cm ²	Mòdul a tallant
E	N/cm ²	Mòdul elàstic
f_m	N/cm ²	Resistència a compressió
Δy	cm	Punt de fluència
Δu	cm	Punt últim
ε	-	Variable normal
n_0	-	Mida de la mostra sense corregir
n	-	Mida de la mostra corregida

Índex de figures i taules

Figures

Figura 1. Barcelona l'any 1849 [M. Cogollo et al.2015].	5
Figura 2. Nuclis importants de Barcelona abans del pla Cerdà [anycerda.org, 15/11/2019].	6
Figura 3. Fulletó divulgatiu de la societat El Fomento del Ensanche de Barcelona [E. Gimeno et al., 1994].	7
Figura 4. Plànol de Barcelona i els seus voltants. Escala 1:15.000 [Arxiu Històric de la Ciutat de Barcelona].	8
Figura 5. Dimensions d'una illa de cases estàndar [Pla Cerdà, ca.wikipedia.org 17/11/2019].	9
Figura 6. Disseny i agrupació inicial de les illes de cases [Pla Cerdà, ca.wikipedia.org 17/11/2019].	9
Figura 7. Comparació de l'àrea de l'Eixample tal i com es va concebre i com és actualment, comparant ambdós amb el casc antic de Barcelona [L.G. Pujades et al., 2010].	10
Figura 8. Comparació de les illes de l'Eixample amb les illes del centre històric de Barcelona [A. Serratosa, 1994].	10
Figura 9. Mapa de zones sísmiques de Catalunya considerant l'efecte del sòl [Institut Cartogràfic de Catalunya, 2001].	12
Figura 10. Mapa del coeficient de contribució en funció de la perillositat sísmica [NCSE-02, 2005].	13
Figura 11. Espectre de disseny de la NCSE-02 en format AD [R.L. Bonett, 2003].	15
Figura 12. Procès de simplificació de l'estructura [Guervara, 2006].	16
Figura 13. Exemple de la corba pushover del primer element de la població a estudiar [Font pròpia]	17
Figura 14. Representació conceptual del tallant aplicat a la base i el desplaçament del sostre [ATC-40, 1996].	18
Figura 15. Exemple de distribució de càrregues laterals [M. Sifón, 2016].	22
Figura 16. Simplificació de l'estructura al sistema equivalent SDOF [P. Fajfar, 1996].	24
Figura 17. Exemple gràfic del mètode N2 per a un sistema SDOF [M. Sifón, 2016].	24
Figura 18. Vista aèria d'una illa de cases i dibuix d'una façana típiques de l'Eixample [L.G. Pujades et al., 2010].	27
Figura 19. . Esquemes modelats i plantes dels tipus d'edificis C1, C2 i E [L.G. Pujades et al., 2010].	28
Figura 20. Dibuix CAD de la façana i l'alçada de l'edifici [J. Avila].	29
Figura 21. Quadre resum tipus amb escala central [C. Bardón, 2015].	29
Figura 22. Dibuix CAD del soterrani i una planta tipus [J. Avila].	30
Figura 23. Representació de l'esforç a compressió [Font pròpia].	33
Figura 24. Esquema per a la medició de l'esforç tallant sobre un cos [ca.wikepeida.org (27/12/2019)].	34
Figura 25. Matriu de propietats mecàniques que inclou histogrames corresponents a la funció densitat de la distribució normal de cada propietat i regressions lineals i coeficients de correlació per a cada combinació de les propietats [J.A. Avila et al., 2017].	39
Figura 27. Corba pushover de la població [Font pròpia].	43
Figura 26. Corba espectre ADRS de la corba pushover de la població [Font pròpia].	43
Figura 29. Corba pushover de la mostra [Font pròpia].	44
Figura 28. Corba espectre ADRS de la corba pushover de la mostra [Font pròpia].	44
Figura 30. Histograma dels punts de fluència de la població [Font pròpia].	45
Figura 31. Histograma dels punts últims de la població [Font pròpia].	46
Figura 32. Histograma dels punts de fluència de la mostra [Font pròpia].	46
Figura 33. Histograma dels punts últims de la població [Font pròpia].	47
Figura 34. Corba bilineal pel CSM de la població [Font pròpia].	48
Figura 35. Corba bilineal pel CSM de la mostra [Font pròpia].	48
Figura 36. Corba bilineal per l'N2 de la població [Font pròpia].	49
Figura 37. Corba bilineal per l'N2 de la mostra [Font pròpia].	49
Figura 38. Corba bilineal segons l'Eurocodigo 8 de la població [Font pròpia].	50

Figura 39. Corba bilineal segons l'Eurocodigo 8 de la mostra [Font pròpia].	50
Figura 40. Corba bilineal segons el mètode d'ajust del 10% per a la població [Font pròpia].	51
Figura 41. Corba bilineal segons el mètode d'ajust del 10% per a la mostra [Font pròpia].	51
Figura 42. Corbes de fragilitat dels estats de dany de la població.	54
Figura 43. Distribucions de les probabilitats de superació de cada estat de dany segons el desplaçament espectral de la població.	54
Figura 44. Corbes de fragilitat dels estats de dany de la mostra.	55
Figura 45. Distribucions de les probabilitats de superació de cada estat de dany segons el desplaçament espectral de la mostra.	55

Taules

Tabla 1. Valors del coeficient del terreny C [NCSE-02, 2009].	14
Tabla 2. L·lindars dels estats de dany RISK-UE [Z.V. Milutinovic, 2003].	37
Tabla 3. Comparativa de la mitjana i la desviació estàndard dels valors objectius i dels valors de la població [J.A. Avila et al., 2017].	39
Tabla 4. Taula de propietats de la corba pushover de la població [Font pròpia].	43
Tabla 5. Taula de propietats de la corba pushover de la població [Font pròpia].	44
Tabla 6. Taula de propietats de les corbes bilineals de la població [Font pròpia].	52
Tabla 7. Taula de propietats de les corbes bilineals de la mostra [Font pròpia].	53
Tabla 8. Propietats dels estats de dany de la població.	56
Tabla 9. Propietats dels estats de dany de la mostra.	56
Tabla 10. Matriu de correlació entre propietats i desplaçament i acceleració espectral de la població.	57
Tabla 11. Matriu de correlació entre propietats i desplaçament i acceleració espectral de la mostra.	58
Tabla 12. Taula de correlacions entre les propietats físiques i els estats de dany i les seves probabilitats per la població.	59
Tabla 13. Taula de correlacions entre les propietats físiques i els estats de dany i les seves probabilitats per la mostra.	60
Tabla 14. Taula del percentatge d'error comes en el desplaçament espectral.	62
Tabla 15. Comparació del resultats de l'espectre de capacitat de població i mostra pel mètode N2 [Font pròpia].	65
Tabla 16. Errors comesos en seleccionar la mostra [Font pròpia].	66
Tabla 17. Taula del consum energètic i emissions produïdes tenint en compte l'ordinador i el vehicle utilitzats en concret [Font pròpia].	67
Tabla 18. Taula pressupost de la realització del treball [Font pròpia].	69

Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	IV
GLOSSARI	V
Glossari d'abreviacions	V
Glossari de símbols.....	V
ÍNDEX DE FIGURES I TAULES	VII
Figures	vii
Taules.....	viii
1. PREFACI	1
1.1 Origen del treball	1
1.2 Motivació.....	1
1.3 Requeriments previs	1
2. INTRODUCCIÓ	3
2.1 Objectius del treball	4
2.2 Abast del treball.....	4
3. ANTECEDENTS HISTÒRICS	5
3.1 El pla Cerdà.....	7
4. ESTAT DE L'ART	11
4.1 Descripció de la demanda sísmica	11
4.2 Descripció de la capacitat	15
4.3 Cobres bilineals	17
4.4 3Muri.....	18
4.5 Descripció dels mètodes estàtics no lineals.....	18
5. L'EDIFICI	27
5.1 Models d'edificis	27
5.2 Característiques constructives	30
6. PROPIETATS MATERIALS	33

6.1.	Esforç a compressió, f_m	33
6.2.	Mòdul de Young, E	34
6.3.	Mòdul de rigidesa, G	34
6.4.	Esforç tallant, τ_0	34
6.5.	Propietats materials d'estudi	34
7.	ESTATS DE DANY	37
7.1.	Fragilitat	37
8.	POBLACIÓ	39
9.	MOSTRA	41
10.	CÀLCULS I RESULTATS	43
10.1.	Corbes de capacitat	43
10.2.	Histograma del punt de fluència i del punt últim	45
10.3.	Corbes bilineals	47
10.4.	Fragilitat	53
10.5.	Estats de dany	56
10.6.	Correlació dels valors d'entrada en front els resultats	57
11.	COMPARATIVA	61
11.1.	Comparativa de les corbes de capacitat	61
11.2.	Comparativa de les corbes bilineals	61
11.3.	Errors entre resultats de població i mostra	62
11.4.	Comparativa de les corbes de fragilitat	62
11.5.	Comparativa de les propietats i els espectres	63
11.6.	Comparativa de les propietats amb els estats de dany i les seves probabilitats	63
CONCLUSIONS	65
ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL	67
PRESSUPOST I ANÀLISI ECONÒMICA	69
BILBIOGRAFIA	71

1. Prefaci

1.1 Origen del treball

Aquest treball és fruit de la col·laboració de la redactant amb el professor Jorge A. Avila, membre del departament de Resistència de Materials i Estructures. Aquest va ser qui va proposar la temàtica d'aquest treball donada la seva ampla investigació en aquest camp, i concretament, tot allò referent al risc sísmic i la vulnerabilitat d'edificis de maçoneria no reforçada pròpies del districte de l'Eixample de Barcelona.

1.2. Motivació

La principal motivació d'aquest treball ha estat l'interès per ampliar el coneixement, tant en l'àmbit de les estructures com, més concretament, aquelles que es troben presents en la ciutat de Barcelona. Tot i no ser l'àmbit propi de l'enginyeria mecànica és igualment interessant, de la mateixa manera en que ho és la investigació que aquest comporta.

Durant el grau d'enginyeria mecànica he cursat assignatures com Resistència dels Materials, Elasticitat o Estructures i Construccions industrials i, tot i obtenir els coneixements que comporten, em va semblar de gran interès poder-los aplicar per tal de determinar comportaments reals en estructures existents.

Concretament, durant l'assignatura d'Estructures i Construccions Industrials se'm va despertar un gran interès per seguir aprenent sobre aquesta temàtica ja que em va resultar molt interessant i donat que la part del grau restant no es centrava en aquesta temàtica, fer aquest treball em va semblar una bona via per seguir aprenent.

1.3. Requeriments previs

Per a la realització d'aquest treball no han estat necessaris coneixements profunds ja que s'ha basat en la recerca i autoaprenentatge, tant del contingut com de les eines per a la seva realització. Amb els conceptes assolits a les assignatures anteriorment esmentades ha estat suficient per a situar-se en primera instància. El que sí ha resultat bàsic són les nocions bàsiques de Mathworks Matlab R2019b, que juntament amb la ajuda que aquest ofereix, han estat bàsiques per a la elaboració dels codis necessaris.

2. Introducció

Quan una estructura és sotmesa a una demanda, com per exemple la d'un moviment sísmic es produeixen moviments horitzontals i verticals que provoquen desplaçaments a les estructures que es troben sotmeses al sisme donat que aquestes estructures tendiran a tornar a la seva posició original. Aquests desplaçaments poden ocasionar danys en menor o major grau segons la gravetat del sisme i l'adequació de les estructures a aquest. Per aquest fet és necessari estudiar el comportament dels edificis davant d'aquest fenomen natura, de manera que es pugui preveure i mitigar el possible dany ocasionat.

Aquest treball pretén estudiar la capacitat d'un edifici del barri de l'Eixample de Barcelona. Aquests edificis, construïts al segle passat van ser dissenyats per suportar únicament càrregues verticals i no es van tenir en compte possibles sismes donada la falta de normativa sísmica del moment. Aquest fet, juntament amb la irregularitat en la elaboració de l'element principal de construcció, el maó, fan que l'estudi de la capacitat de l'edifici sigui de gran rellevància. Tot i que Barcelona no es troba en una zona d'alt risc sísmic, aquests moviments, juntament amb l'addició de noves tipologies estructurals en contacte directe són fenòmens a tenir en compte.

En aquest treball veurem els diversos models d'edificis de l'Eixample de Barcelona i més en concret el model d'estudi. L'edifici ha estat prèviament modelat per un programa d'anàlisi d'edificis de maçoneria no reforçada, com és el cas dels edificis de l'Eixample. Aquest programa, mitjançant la simplificació de l'estructura inicial per tal de poder dur a terme l'estudi, aporta la capacitat d'aquest per a diferents combinacions de propietats físiques. Veurem diversos mètodes simplificats d'estudi de la capacitat estructural de l'edifici i les seves representacions i triarem el que creiem més adequat per a procedir amb els càlculs comparant punts importants de la corba de capacitat, com són el punt de fluència o el punt últim. Introduint la demanda a aquests punt indicatius de la capacitat podrem determinar el seu desenvolupament sísmic.

Veurem les propietats físiques de la maçoneria més rellevants estructuralment i la relació existent entre elles. Parlarem i calcularem els estats de dany que poden ocórrer a l'edifici, els efectes que poden tenir sobre l'estructura i les probabilitats de cada tipus.

Les combinatòries de les propietats obtingudes ens permetran crear una població i determinarem una mostra més petita que compararé, esperant així poder agilitzar el procés simplificant els càlculs de cara al futur.

Amb tot això i per tal d'agilitzar el volum de feina de futures comparatives similars a aquesta, el que es pretén amb els càlculs és determinar una mida de població per tal de no haver de processar una gran població i de la mateixa manera veure quines propietats són més influents en els resultats.

2.1. Objectius del treball

L'objectiu general d'aquest treball és l'avaluació de la capacitat estructural d'una estructura de maçoneria no-reforçada mitjançant metodologies simplificades, tenint en compte la variabilitat de les propietats mecàniques dels materials. L'estudi es centrarà en un únic edifici situat al barri de l'Eixample de Barcelona.

D'aquesta avaluació es tenen dos objectius particulars. El primer és determinar la suficiència i representativitat d'una mostra de la població total dels models, amb la finalitat d'estalviar recursos en futurs estudis similars.

Amb la mateixa finalitat, el segon dels objectius particulars és el de determinar la influència en els resultats de les diferents propietats mecàniques materials seleccionades com variables aleatòries.

2.2. Abast del treball

Inicialment, en aquest treball es farà un estudi històric i teòric de les característiques constructives de l'edifici d'estudi, el qual és representatiu del barri de l'Eixample. S'introduirà els conceptes de demanda i capacitat i les diferents maneres de representació d'aquesta última.

Veurem el programa del modelat de l'edifici que tot i ser un treball previ és important i necessari donat que serà el nostre punt de partida. Tota la informació d'entrada obtinguda anteriorment ha estat proporcionada pel tutor. Per tal de poder processar les corbes de capacitat s'empraran mètodes estàtics no-lineals, els quals seran comparats per veure quin s'adequa més a l'estructura en qüestió.

Per a l'aplicació d'aquests mètodes i els càlculs posteriors, com són les diferents figures i propietats que representen el conjunt de corbes de capacitat, propietats materials, estats de dany i correlacions és necessari el programa de computació numèrica com és el Matlab (Mathworks Matlab R2019b).

3. Antecedents històrics

Barcelona és una ciutat ubicada a la vora del mar Mediterrani i limitada pels rius Llobregat i Besós. Aquest fet ofereix una ubicació de la ciutat excel·lent i una bona comunicació marítima a més d'aèria. Aquests fets, juntament amb l'increment de població que ha patit Barcelona al llarg dels anys, han influït en el desenvolupament urbanístic de la ciutat des de la seva fundació a l'època romana fins a l'actualitat.



Figura 1. Barcelona l'any 1849 [M. Cogollo et al.2015].

A principis del segle XVIII, Felip V va manar construir una muralla que envoltava la ciutat per tal de protegir-la ja que s'havia convertit en una plaça miliar estratègica pels interessos de la Corona (veure Figura 1). Per tal de poder a dur a terme la construcció de la muralla es van enderrocar 1350 cases i els seus habitants van ser reubicats a la Barceloneta. Fins a llavors, la ciutat havia crescut dins d'aquests límits i correspon al que avui en dia coneixem com a Ciutat Vella. Aquesta muralla havia estat una limitació pel creixement de la ciutat i va ser enderrocada al segle XIX per petició de la població, ja que era un clar signe de repressió política i econòmica. La desaparició de la muralla va permetre l'expansió de la ciutat cap a la plana confrontada amb les limitacions de la serralada de Collserola a l'est, el riu Llobregat al sud i el Besós al nord [enciclopèdia.cat, 21/10/2019].

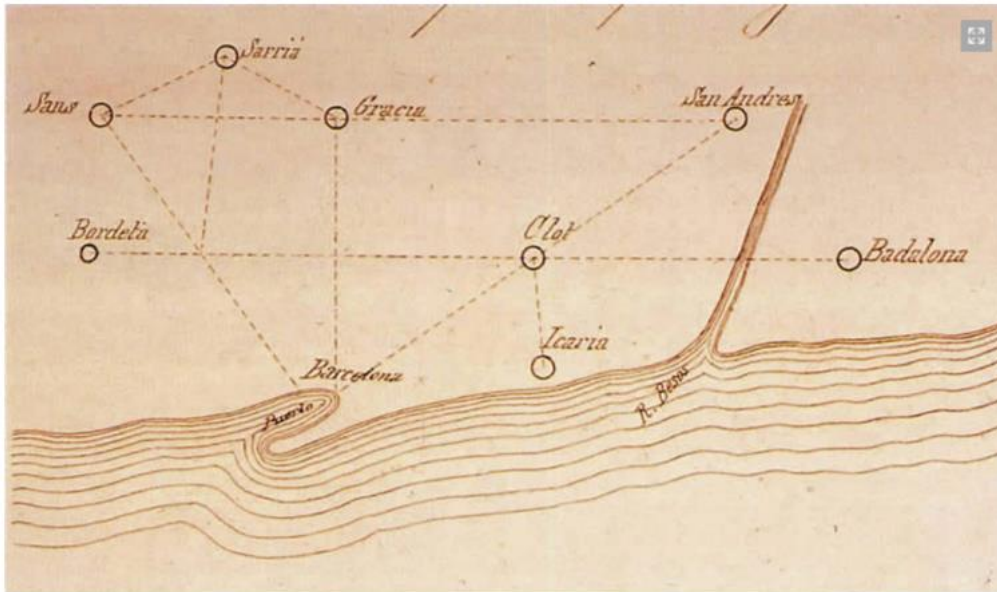


Figura 2. Nuclis importants de Barcelona abans del pla Cerdà [anycerda.org, 15/11/2019].

La revolució progressista va arribar a Barcelona entre el 1854 i el 1856. Aquest fet va ser plasmat en el projecte de l'Eixample dut a terme per Ildefons Cerdà que suposaria la major ampliació territorial de Barcelona i l'annexió amb els pobles del voltant (veure Figura 2). El governador militar de Barcelona va encarregar la redacció d'un plànol topogràfic dels voltants de la ciutat a Cerdà i aquest es va implicar en el projecte de ple i va recopilar tota la informació necessària per dur a terme l'ampliació. Al 1859 Cerdà rep l'ordre des del govern central de verificar l'estudi sobre el pla de l'Eixample. Davant aquesta situació, al febrer de l'any 1859 el Consistori de Barcelona va treure a concurs aquest projecte i s'hi va presentar el mateix Cerdà, elaborant el seu projecte anomenat "Plano de los alrededores de Barcelona y proyecto de su reforma y ensanche" en tant sols quatre mesos (veure Figura 3). El guanyador d'aquest fou l'arquitecte Rovira i Trias però paral·lelament el Govern central va encarregar el mateix projecte a Cerdà, imposant el projecte mitjançant un decret que anul·lava la decisió de l'ajuntament. L'encàrrec d'aquest va venir acompanyat de crítiques degut la creença de que era una imposició del govern central i suposava molt desapfitament de l'espai [J. Muñoz, 2009].

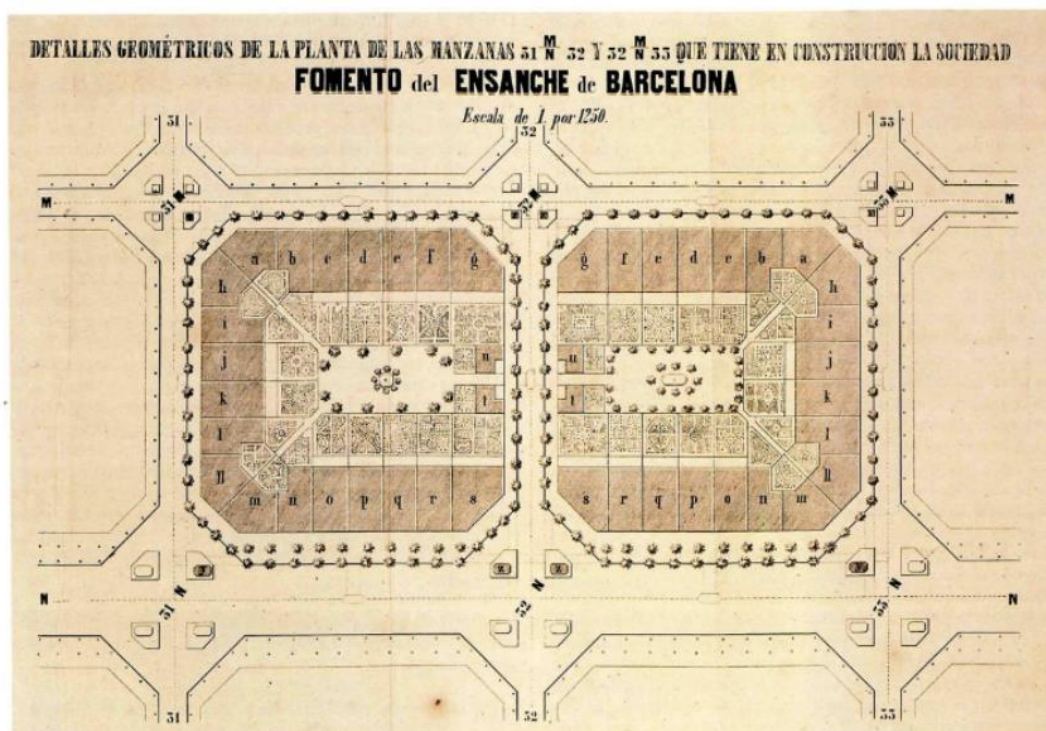


Figura 3. Fulletó divulgatiu de la societat El Fomento del Ensanche de Barcelona [E. Gimeno et al., 1994].

Durant els segles més recents, la ciutat ha estat influenciada per diferents conceptes de disseny com el modernisme, el noucentisme i, posteriorment, el postmodernisme. Aquests estils han anat deixant la seva marca al paisatge urbà de la ciutat. El projecte de l'Eixample fou la gran transformació de la ciutat durant el segle XX i comprèn alguns dels edificis més representatius del modernisme català. Dins d'aquest període, es destaca l'arquitecte Antoni Gaudí, autor d'obres com la Pedrera (Casa Milà), el Parc Güell o la Sagrada Família.

3.1. El pla Cerdà

L'Eixample es va construir als anys de la industrialització de Catalunya envoltant el que era la ciutat de Barcelona, delimitat per la Ciutat Vella al sud-oest, i és considerat un dels projectes més pioners en l'evolució de l'urbanisme modern. L'Eixample ocupa la part central de la ciutat i té una superfície de 7,46 km [Estadística i Difusió de Dades, bcn.cat 17/11/2019]. Tot i no ser el districte més ampli és el més poblat amb 264.874 habitants [Institut d'Estadística de Catalunya, idescat.cat 17/11/2019].



Figura 4. Plànol de Barcelona i els seus voltants. Escala 1:15.000 [Arxiu Històric de la Ciutat de Barcelona].

El 8 de juliol de 1860 s'ordena l'execució de les obres de l'Eixample i la reina Isabel II inicià les obres col·locant la primera pedra al que ara coneixem com la plaça Catalunya. El procés de construcció es va veure endarrerit per raons econòmiques fins al 1870, quan un grup d'inversors van decidir invertir en el projecte i, més tard, al 1888, l'exposició Universal també va acabar impulsant el continuament de les obres. Per últim, al segle XX, la burgesia va decidir recolzar el Modernisme amb edificis dedicats al lloguer i aquest fet va permetre l'expansió de nou de l'Eixample.

Cerdà pretenia amb els seu projecte una ciutat amb carrers amples i espais verds i per això va dissenyar la ciutat sobre una quadricula (veure Figura 4), proporcionant al projecte una geometria estricta trencada per grans avingudes en diagonal. Les cantonades de les illes de cases no eren estrictament quadrades sinó que disposaven d'un xamfrà per facilitar la visió a les cantonades i només tenien construcció en dos dels quatre cantons i preveien carrers de 20 metres d'ample. Aquests carrers facilitaven el trànsit de persones i vehicles ja que tots els encreuaments es troben a la mateixa distància i per tant no existeixen carrers més còmodes que altres. Més tard, Cerdà va proposar "l'Eixample il·limitat", fent de les illes de cases una quadricula regular i impertorbable. Les dimensions dels costats dels quadrilàters és de 113,3 metres amb 15 metres destinats a cada xamfrà (veure Figura 5) [M. Cogollo, 2015].

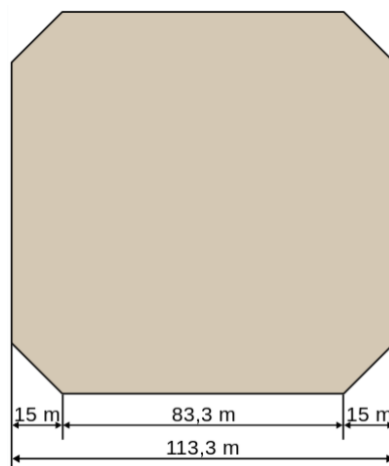


Figura 5. Dimensions d'una illa de cases estàndard [Pla Cerdà, ca.wikipedia.org 17/11/2019].

Pel que fa a l'espai interior de cada illa, inicialment es van concebre dues formes bàsiques per situar els edificis, una amb dos blocs paral·lels situats en els costats oposats, deixant un gran espai verd longitudinal a l'interior que travessa els carrers, i una altre situant els blocs en forma de L, amb un jardí interior quadrat travessat per dos carrers longitudinals (veure Figura 6). Finalment, amb el pla de "L'Eixample il·limitat", les illes van ser tancades amb edificis al llarg dels seus quatre costats (veure Figura 7).

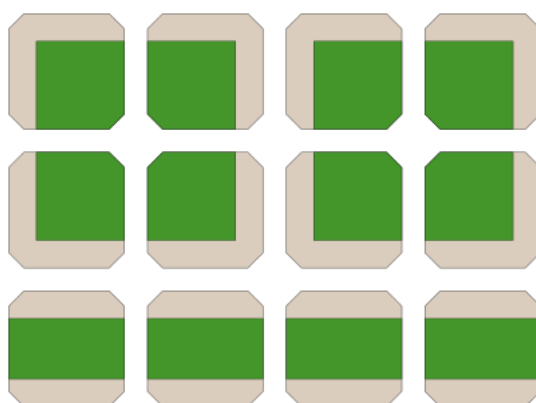


Figura 6. Disseny i agrupació inicial de les illes de cases [Pla Cerdà, ca.wikipedia.org 17/11/2019].

Com Cerdà es va preocupar per la salut mental i social dels ciutadans de Barcelona, no només va pensar en la tranquil·litat que aportarien aquests espais verds, sinó que també va pensar en la importància del Sol a la vida de la gent. Justificat per la idea de que el Sol entrés a tots els carrers sense l'impediment dels propis edificis, aquests no podien ser més alts que l'amplada dels carrers i s'arriba a la conclusió que, si els carrers havien de tenir 20 metres d'amplada, l'alçada havia de ser de 16 metres. Més tard, mitjançant remuntes, els edificis es van alçar fins els 20 metres ja que considerant incidència solar de 45º no havien de fer-se ombra entre ells [F. Muñoz, 2009].

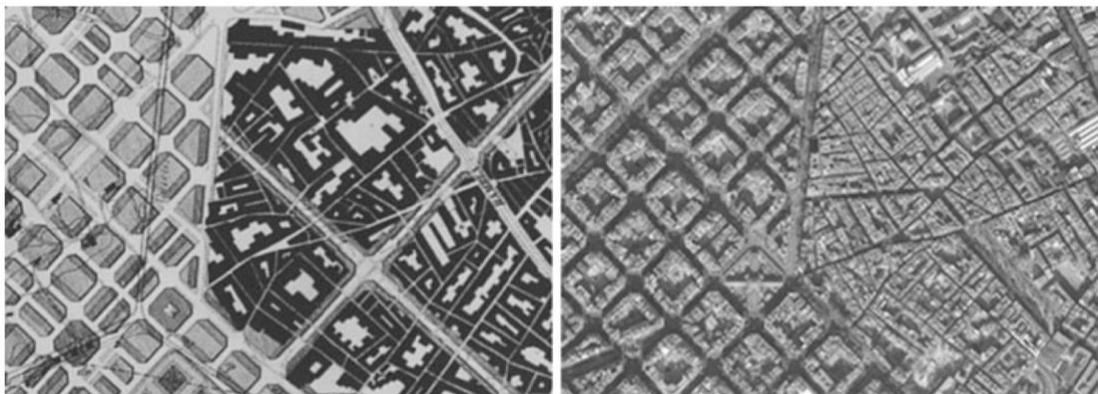


Figura 7. Comparació de l'àrea de l'Eixample tal i com es va concebre i com és actualment, comparant ambdós amb el casc antic de Barcelona [L.G. Pujades et al., 2010].

Els pisos del seu interior haurien de tenir vistes tant al carrer com al pati interior de l'illa de cases, en contraposició amb el model urbanístic del centre històric de la ciutat, el qual es molt tancat, amb carrers estrets i foscos (veure Figura 8). Aquests pretenien ser espais verds que facilitarien als nens jugar al carrer, sense el perill de la circulació dels carrers, i a la gent gran passejar, però amb els temps es va anar perdent aquest concepte. En tancar les illes, la zona central es va ocupar de edificacions baixes que servien com a tallers o petites indústries familiars, fent desaparèixer a la majoria de jardins centrals.

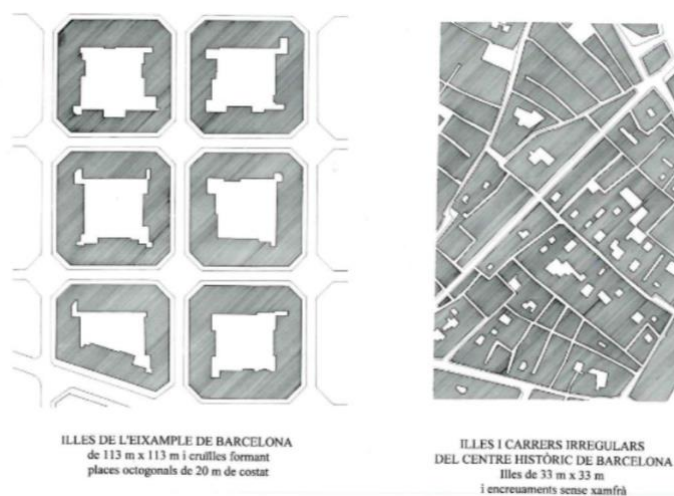


Figura 8. Comparació de les illes de l'Eixample amb les illes del centre històric de Barcelona [A. Serratos, 1994].

4. Estat de l'art

A continuació parlarem sobre el desenvolupament dels edificis. El nivell de desenvolupament descriu un estat límit de dany determinat pel punt últim on s'esgota la capacitat de l'estructura. Aquest punt es pot obtenir mitjançant diversos mètodes, els quals descriurem en aquest apartat, que ens proporcionen espectres de capacitat amb el punt de fluència i el punt últim que ajudaran a determinar l'estat de dany de l'edifici. La determinació del desenvolupament de l'edifici consistirà en la comparació dels espectres de capacitat segons els diferents mètodes amb l'espectre de demanda.

4.1. Descripció de la demanda sísmica

Com ja hem esmentat anteriorment, el pla de Cerdà original s'ha anat modificant per tal de abastir l'augment de població que ha anat patint Barcelona durant els anys, arribant a xifres de fins a 3.000 habitants per illa de cases en l'actualitat.

El edificis de maçoneria, que en la seva majoria daten d'abans de l'any 1900, van ser dissenyats a càrrega vertical i sense tenir en compte possibles demandes sísmiques. Utilitzem el concepte de demanda sísmica per definir la intensitat efectiva deguda a una acció sísmica que entra a la estructura de l'edifici. Barcelona es troba a una regió amb baixa activitat sísmica tot i que compta amb poca informació al respecte i està classificada com a zona amb grau d'intensitat VI en l'escala Medvédev-Sponheuer-Kárník (MSK-64) [SISMICAT, Annex 3 2014] segons la normativa Norma de Construcció Sismoterrestre (NCSE-02) [NCSE-02, 2009] (veure Figura 9). Tot i això, ha estat possible obtenir dades de l'acceleració per poder realitzar l'avaluació del possible dany que podrien sofrir les estructures que es troben a la ciutat [R. L. Bonett, 2003].

El mètode de control de sismes anteriorment era la utilització d'escala d'intensitat, però el fet de definir per un únic paràmetre el sisme convertia aquest mètode en un mètode subjectiu. Amb la fi de normalitzar a nivell Europeu l'estudi dels sismes es va crear l'Escala Macrosísmica Europea (EMS-98) [Comisión Sismológica Europea, 1998], composta per 12 graus de dany on es descriuen clarament les accions de cada sisme, numerats en nombres romans i de menys a més impacte. L'Institut Cartogràfic de Catalunya realitza un estudi sobre les possibles intensitats de sismes considerant l'efecte del sòl.

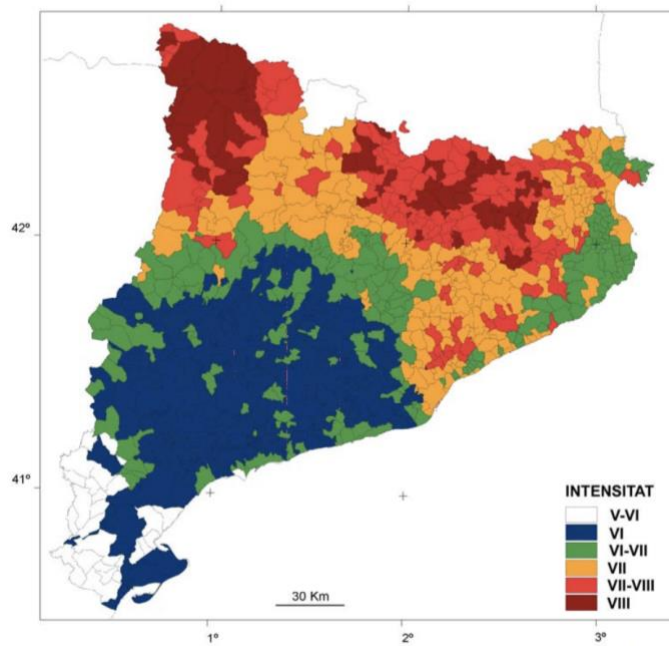


Figura 9. Mapa de zones sísmiques de Catalunya considerant l'efecte del sòl [Institut Cartogràfic de Catalunya, 2001].

Actualment hi ha diverses maneres de considerar un sísmic a una regió, des de mètodes que sorgeixen de la intensitat macrosísmica, fins a espectres de resposta proposats per codis de disseny.

El concepte d'espectre neix a principis del segle XX i és un instrument fonamental pel càlcul de resistència d'estructures afectades per sísmes. Es representa com un gràfic de la resposta màxima, comunament en valors d'acceleració, que genera un sísmic sobre una estructura. L'espectre és el gràfic resultant d'un conjunt de cobres proporcionades per la màxima resposta d'oscil·ladors.

L'actual normativa sísmica a l'estat es regeix per la NCSE-02 i defineix l'amenaça d'un sísmic en funció de [R.L. Bonett, 2003]:

- L'acceleració sísmica bàsica a_b , la qual da referència al valor característic de l'acceleració horitzontal de la superfície del terreny corresponent a un període de retorn de cinc-cents anys.
- El coeficient de contribució K , que té en compte la influència dels diferents tipus de sísmes esperats a cada punt del territori.

Per calcular l'acceleració horitzontal característica a partir de la intensitat MSK es segueix la següent correlació (veure equació 1):

$$\log_{10} a = 0,30103 I - 0,2321 \quad (1)$$

On a ve expressada en gals (10^{-2} m/s^2).

La forma de l'espectre elàstic d'acceleracions que proposa la norma NCSE-02 per a un coeficient d'amortiment ν crític del 5% es defineix com (veure equació 2):

$$S_a(T) = \begin{cases} 1 + 1,5 \frac{T}{T_A} & \text{si } T < T_A = K \frac{C}{10} \\ 2,5 & \text{si } T_A \leq T \leq T_B \\ K \frac{C}{T} & \text{si } T > T_B = K \frac{C}{2,5} \end{cases} \quad (2)$$

On:

$S_a(T)$	[g] és el valor del espectre de resposta elàstica.
T	[s] és el període de la oscil·lació.
K	és el coeficient de distribució.
C	és el coeficient del terreny.
T_A i T_B	[s] són períodes característics del espectre.

El valor del coeficient de distribució K depèn del territori (veure Figura 10) prenent $K=1$ en el cas de Barcelona segons la NCSE-02.



Figura 10. Mapa del coeficient de contribució en funció de la perillositat sísmica [NCSE-02, 2005].

El coeficient del terreny depèn del tipus de terra i com ens trobem a l'Eixample (Barcelona) on la velocitat de propagació de les ones elàstiques tallants V_s està compresa entre 400 m/s i 750 m/s, el coeficient $C=1,3$ segons la taula 1:

Tabla 1. Valors del coeficient del terreny C [NCSE-02, 2009].

Tipus de terreny	Coeficient C
I	1.0
II	1.3
III	1.6
IV	2.0

Per a obtenir l'espectre de disseny es necessari multiplicar els valors de l'espectre elàstic de resposta i el valor d'acceleració sísmica a_c definit per l'equació (3):

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b \quad (3)$$

On:

- a_b és l'acceleració bàsica
- ρ és el factor de risc, relacionat amb la importància de l'estructura i la vida útil de l'edifici. El seu valor es troba entre 1 (importància normal) i 1,3 (importància especial).
- S és el coeficient d'ampliació i depèn del tipus de terreny i el valor del producte $\rho \cdot a_b$.

Aquest últim queda definit per la següent equació a trossos en funció del producte $\rho \cdot a_b$ (veure equació 4).

$$S = \begin{cases} \frac{c}{1,25} & \rho \cdot a_b \leq 0,1g \\ \frac{c}{1,25} + 3,33 \left(\rho \frac{a_b}{g} - 0,1 \right) \left(1 - \frac{c}{1,25} \right) & 0,1g < \rho \cdot a_b < 0,4g \\ 1 & 0,4 \leq \rho \cdot a_b \end{cases} \quad (4)$$

La Figura 11 mostra l'espectre de disseny proposat per la NCSE-02 per a la ciutat de Barcelona en format AD (Acceleració-Desplaçament) per a un edifici d'importància normal.

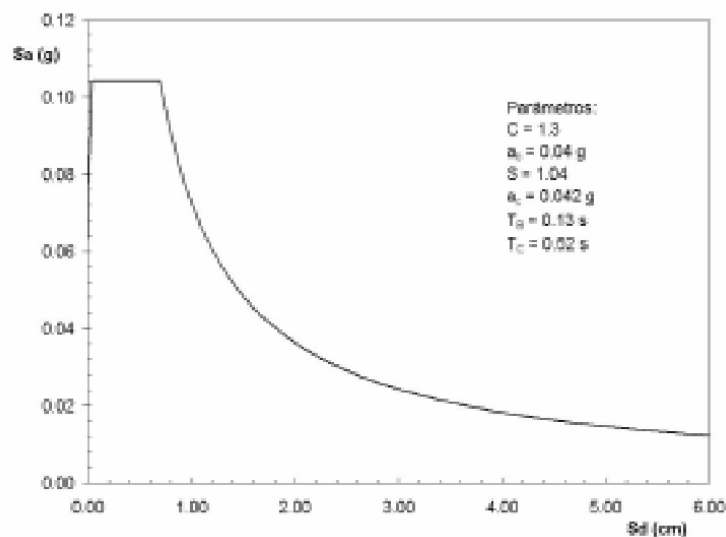


Figura 11. Espectre de disseny de la NCSE-02 en format AD [R.L. Bonett, 2003].

4.2. Descripció de la capacitat

Aquest treball pretén donar informació útil per a futurs estudis i anàlisis sísmics de diferents edificis modelats prèviament amb programes com 3muri (l'utilitzat en el nostre cas). Per això, s'utilitzen l'espectre de la demanda i l'espectre de la capacitat, fent referència als moviments sísmics i a la resistència dels edificis respectivament, i encreuant-los mitjançant diferents mètodes per tal de trobar el punt d'acompliment (indicador del nivell de dany a l'estructura). La capacitat estructural és la resistència d'una estructura per a suportar l'efecte d'accions externes, en aquest cas sísmes, mantenint la seva integritat i funcionalitat fins a cert punt. Aquesta capacitat es pot determinar a partir de procediments realitzats de manera estàtica o dinàmica, tenint en compte la linealitat o plasticitats de les estructures. En el nostre cas, l'edifici ha estat sotmès a un anàlisi estàtic no-lineal per a obtenir la corba de capacitat, o també anomenada *pushover* [R.L. Bonett, 2003].

En aquest tipus d'anàlisi es considera la demanda sísmica induïda pels moviments del terreny que donen lloc a desplaçaments laterals a l'estructura, provocant deformacions elàstiques o plàstiques en funció de la magnitud del sísmes. Donat que el mètode no-lineal, anomenat NSP, no pot estimar de manera relativament fàcil el comportament inelàstic s'han desenvolupat mètodes simplificats els quals són molt utilitzats degut a la seva fàcil aplicació (veure Figura 12). La finalitat d'aquests mètodes és la d'obtenir resposta en valors de desplaçament de l'estructura al aplicar-li el sísmes mitjançant la corba del tipus pushover, la qual compara la capacitat de resistència i deformació.

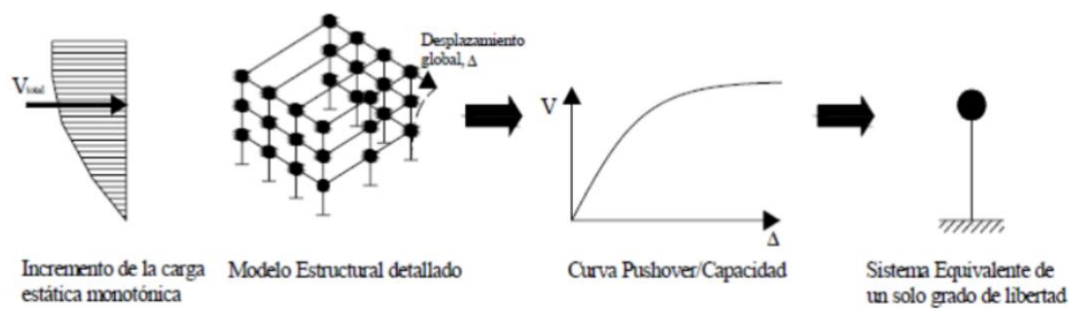


Figura 12. Procés de simplificació de l'estructura [Guervara, 2006].

4.2.1. Corba pushover

A la corba pushover s'hi representa el tallant basal a la base aplicat a l'edifici en funció del desplaçament del sostre i s'hi distingeixen tres punts claus:

1. El punt de fluència o *yielding*.
2. El punt de màxim tallant basal.
3. Punt de capacitat última.

El punt de fluència és el punt de la gràfica on acaba la zona de deformació no permanent i la zona de deformació permanent. Fins aquest punt l'estructura es comporta de manera elàstica i és en aquest tram on s'hi defineix el mòdul elàstic o mòdul de Young. A partir del punt de fluència l'edifici entra a la zona plàstica. En aquesta fase, a diferència de la fase elàstica, l'edifici no recupera el seu estat original i és en aquesta part on trobem el punt de màxim tallant basal. La zona plàstica es prolonga fins el punt de capacitat última, que és on s'assumeix que la capacitat de l'estructura s'esgota, provocant el seu col·lapse parcial o total. Aquest gràfic és una aproximació del comportament de l'estructura un cop superat el límit elàstic (veure Figura 14).

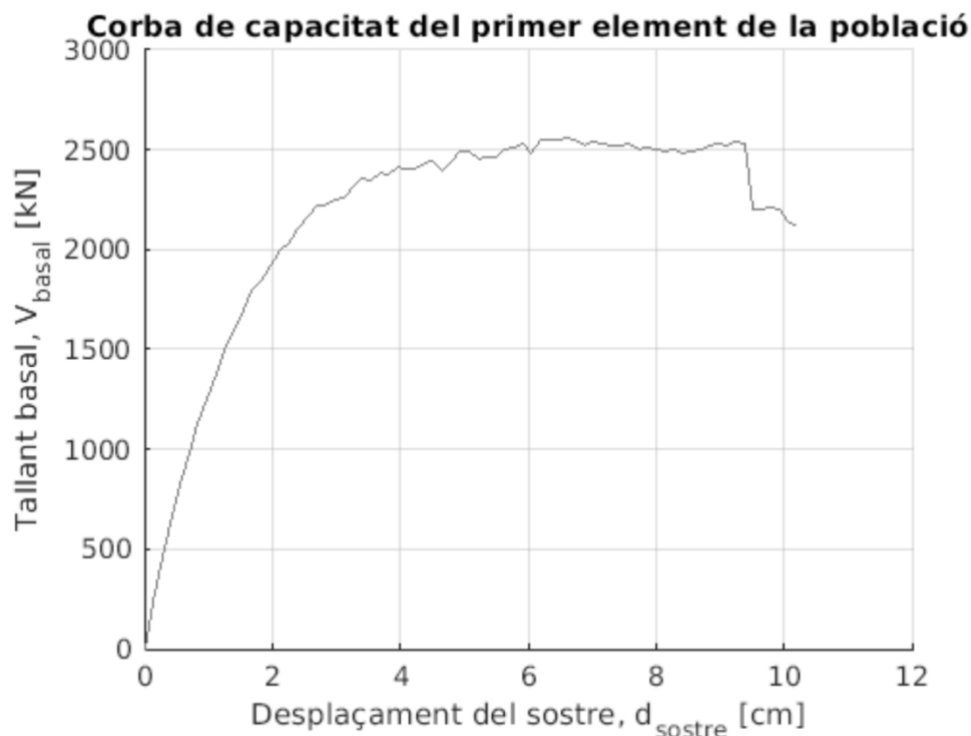


Figura 13. Exemple de la corba pushover del primer element de la població a estudiar [Font pròpia]

Les irregularitats que es troben a partir del punt de fluència es mantenen al llarg de la zona plàstica. Els punts on es presenten pujades reflecteixen el treball que exerceixen elements que abans no treballaven. En canvi, quan elements que sí exercien treball deixen de fer-ho es donen a les baixades de la corba.

4.3. Cobres bilineals

La corba de capacitat, i com veurem més endavant, el seu espectre de capacitat, pot ser representat en format bilineal. Aquest és útil per definir els estats de dany i s'utilitzen per a simplificar els càlculs degut a les limitacions que havia en el moment de la seva concepció [Y.F. Vargas, 2013].

Les hipòtesis per construir l'espectre de capacitat bilineal son:

1. L'àrea sota la corba bilineal ha de ser igual a l'àrea de la corba original. Aquest fet representa la igualtat d'energia sota les dues corbes.
2. Les coordenades del punt de màxim desplaçament ha de coincidir en les dues corbes.
3. El pendent del tram inicial ha de ser el mateix en les dues corbes.

4.4. 3Muri

3Muri és un programa desenvolupat per STA DATA [S. Lagomarsino et al., 2008]. El motor de càlcul ha estat desenvolupat a la Universitat de Gènova per l'equip de recerca del professor Sergio Lagomarsino. Es tracta d'un programa d'anàlisi tridimensional no lineal per estructures de maçoneria basat en l'ús de macro-elements. El model està enfocat a l'anàlisi incremental no lineal, controlant la força o el desplaçament, l'anàlisi pushover, modal i dinàmic (veure Figura 13).

Ja que el programa considera els efectes de la limitació que té la maçoneria a compressió i inclou els efectes d'esquerdes a la zona plàstica amb deteriorament de la rigidesa, està dissenyat per edificis de maçoneria sigui reforçada o no. A partir del CAD, el programa detecta connexions i murs per simular el comportament de l'edifici i atorga 5 o 3 graus de llibertat respectivament. Aportant algunes propietats i la força basal aplicada, el programa retorna la corba pushover [S. Lagomarsino, 2008].

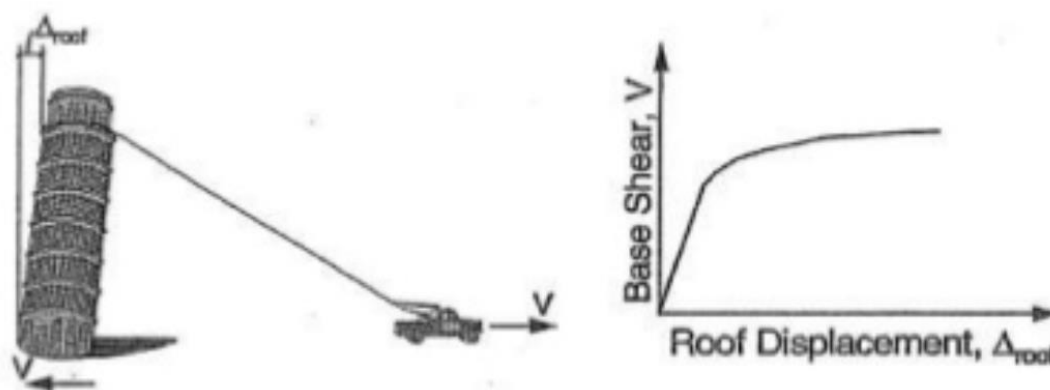


Figura 14. Representació conceptual del tallant aplicat a la base i el desplaçament del sostre [ATC-40, 1996].

4.5. Descripció dels mètodes estàtics no lineals

A continuació exposarem els quatre mètodes amb els que durem a terme aquesta comparativa: l'Eurocódigo 8, el mètode de l'Espectre de Capacitat, el mètode N2 i finalment el mètode de l'ajust del 10%. Aquests mètodes tenen per finalitat l'avaluació del risc sísmic d'una estructura comparant els espectres de capacitat i demanda. Tots ells han estat inclosos en algunes normatives d'àmbit estatal o europeu i és per això que els tenim en compte i comparem entre ells.

En aquest estudi, tot i dur a terme tots els mètodes explicats a continuació. Tot i ser el mètode de l'Espectre de Capacitat el mètode original, en aquest cas no ens és d'utilitat donat que es va elaborar i dissenyar per a estructures de formigó reforçat i en aquest treball estudiem estructures de maçoneria no reforçada.

Al llarg d'aquest temps, s'han desenvolupat diferents variacions de mètodes estàtics no-lineals, dins els quals els més utilitzats a dia d'avui són els que expliquem a continuació.

4.5.1. Mètode de l'Espectre de Capacitat

El Mètode de l'Espectre de Capacitat, en anglès *Capacity Spectrum Method*, permet avaluar ràpidament el risc sísmic d'una estructura. Comparant l'espectre de capacitat de l'edifici i l'espectre d'un sisme en concret s'obté el punt d'acompliment o punt de capacitat per demanda. Aquest es troba on tallen les dues corbes i correspon al punt de màxima sol·licitud estructural.

El Mètode de l'Espectre de Capacitat va ser proposat inicialment per Sigmund Freeman (*Evaluations of Existing Buildings for Seismic Risk*, 1975) i ha estat utilitzat més recentment amb algunes modificacions. Aquest procediment equipara l'amortiment viscos al amortiment histerètic, que és aquell que es troba en fase amb la velocitat., proporcionant un enllaç amb les característiques reals de l'estructura. Per contra, és un procediment lent i existeix certa controvèrsia pel que fa a la precisió i a la seva base teòrica [M. Sifón, 2016].

4.5.2. Mètode N2

En aquest treball prendrem de referència el mètode N2 degut al seu àmbit d'aplicació europeu i la seva correcta adequació al tipus d'estructura i és per això que es detalla a continuació. No obstant, la resta de mètodes també seran emprats en alguns dels càlculs.

El mètode N2, on 'N' representa la no-linealitat i '2' els dos models matemàtics en els que es basa, va ser proposat pels professors Peter Fajfar i Matej Fishinger a finals de l'any 1987 (*Earthquake resistance of the "SCT" large panel building system*, 1987) i s'ha anat perfeccionant amb el pas dels anys. Aquest mètode es diferencia del mètode CSM principalment per tipus d'espectre de demanda, determinat indirectament per l'espectre elàstic de demanda mitjançant factors de reducció. Combina l'anàlisi estàtic no-lineal d'un model pla de múltiples graus de llibertat (*Multiple Degree Of Freedom* MDOF) amb l'anàlisi de l'espectre de resposta d'un sistema d'un sol grau de llibertat (SDOF) equivalent [M. Sifón, 2016].

Fajfar descriu una sèrie de passos per tal de poder aplicar el seu mètode:

1. Recopilació de la informació

El model estructural MDOF ha d'anar acompanyat de la informació necessària per a un anàlisi elàstic i de relacions no-lineals de força-deformació per a tots els elements estructurals, tot tenint en compte el coeficient d'amortiment. Es concentrarà la plasticitat als extrems dels elements de tipus barra i es mostrarà la demanda sísmica representada mitjançant un espectre d'acceleració elàstica.

2. Espectre de demanda sísmica en format ADRS

Per a un sistema elàstic d'un sol grau de llibertat (SDOF) s'aplica la relació (5):

$$S_{de} = \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae} \quad (5)$$

On S_{ae} i S_{de} són els valors de l'acceleració i el desplaçament elàstics respectivament referents a un període T i un amortiment fixat. En el cas d'un SDOF inelàstic amb una relació bilineal de força-desplaçament els espectres es determinen mitjançant (6) i (7).

$$S_a = \frac{S_{ae}}{R_\mu} \quad (6)$$

$$S_d = \frac{\mu}{R_\mu} S_{de} = \frac{\mu}{R_\mu} \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae} = \mu \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \quad (7)$$

On:

S_a és l'acceleració espectral;

S_d és el desplaçament espectral;

μ és el factor de ductilitat definit com la proporció entre el desplaçament màxim i el corresponent al límit elàstic.

R_μ és el factor de reducció a causa de la ductilitat.

El factor de reducció és clau en el procés realitzat per a la simplificació del mètode i s'obté mitjançant la igualtat (8).

$$\begin{aligned} T < T_c: \quad R_\mu &= (\mu - 1) \frac{T}{T_c} + 1 \\ T_c \leq T: \quad R_\mu &= \mu \end{aligned} \quad (8)$$

On T_c és el període característic del terreny, on es passa del tram de l'espectre d'acceleració constant al tram de velocitat constant.

3. Anàlisi pushover

En aquest punt s'obté una relació no-lineal de força-desplaçament per al sistema MDOF. Generalment s'utilitza l'esforç tallant en la base i el desplaçament en el sostre de l'edifici. La corba obtinguda variarà en funció de la càrrega lateral distribuïda que es seleccioni però en general, les variacions seran relativament petites. En aquest mètode, s'anomena P al vector de càrregues laterals i es determina mitjançant l'equació (9).

$$P = p\psi = pM\Phi \quad (9)$$

On:

- P és el vector de càrregues laterals;
- M és la matriu diagonal de masses;
- p és la magnitud de càrregues laterals;
- ψ és la distribució de càrregues laterals;
- Φ és la forma del desplaçament assumit.

Així doncs, la forma del desplaçament i de la distribució de forces no són independents com en altres mètodes. La força lateral en el nivell i és proporcional al component Φ_i de la forma assumida Φ , ponderat per la massa m_i (10).

$$P_i = p \cdot m_i \cdot \Phi_i \quad (10)$$

Les càrregues laterals es determinen d'aquesta manera ja que si la forma que assumim pels desplaçaments fos exactament igual i constant durant el sísmic les distribucions de forces laterals i efectives serien iguals també. D'altra banda, el pas d'un sistema de múltiples graus de llibertat a un sistema d'un sol grau de llibertat i al revés és directa.



Figura 15. Exemple de distribució de càrregues laterals [M. Sifón, 2016].

4. Sistema SDOF equivalent i diagrama de capacitat

La demanda sísmica es determina a partir de l'espectre de resposta i és necessari modelar el sistema MDOF com a SDOF. El comportament es considera inelàstic i l'equació de moviment del model com a punt de partida (11).

$$M\ddot{U} + R = M1a \quad (11)$$

On:

- \ddot{U} és el vector de desplaçaments;
- R és el vector de forces internes;
- 1 és el vector unitat;
- a és l'acceleració del terra en funció del temps.

Per a simplificar els càlculs s'assumeix que la forma del desplaçament no varia durant el sisme i el seu vector es defineix segons (12):

$$\ddot{U} = \Phi \cdot D_t \quad (12)$$

On:

- D_t és el desplaçament del sostre variable en el temps;
- Φ és el vector de forma normalitzat i de valor 1.

Donat que les forces internes R són iguals a les càrregues externes aplicades P , es poden realitzar una sèrie d'operacions amb (9), (11), (12) i la igualtat $P=R$ fins a arribar al desplaçament i les forces equivalents del sistema SDOF, essent aquestes:

$$D^* = \frac{D_t}{T} \quad (13)$$

$$F^* = \frac{V_{base}}{T} \quad (14)$$

Essent:

D_{roof} és el desplaçament en el sostre del sistema MDOF;

V_{base} és el tallant a la base del sistema MDOF;

D^* és el desplaçament en el sostre equivalent del sistema SDOF;

F^* és la força equivalent del sistema SDOF;

Γ és la constant de transformació. Factor de participació modal i es defineix amb la següent equació:

$$\Gamma = \frac{\Phi^T M 1}{\Phi^T M \Phi} = \frac{\sum m_i \Phi_i}{\sum m_i \Phi_i^2} = \frac{m^*}{\sum m_i \Phi_i^2} \quad (15)$$

On m^* és la massa equivalent en el sistema SDOF. Aquest factor s'aplica tant a forces com a desplaçaments i per tant, la relació entre aquests al sistema MDOF també és aplicable al SDOF. El procediment gràfic d'aquest mètode requereix que la rigidesa post-elàstica sigui zero i és degut a que el factor de reducció R_μ és el radi entre la força elàstica requerida i la força de plastificació.

El període elàstic T^* del sistema idealitzat bilineal es determina segons la equació següent (16):

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* D_y^*}{F_y^*}} \quad (16)$$

On:

T^* és el període elàstic del sistema idealitzat bilineal;

F_y^* força de plastificació del sistema idealitzat bilineal;

D_y^* desplaçament de plastificació del sistema idealitzat bilineal,

Finalment, el diagrama en el format ADRS s'obté dividint les forces del diagrama força-deformació per la massa equivalent (14).

$$S_a = \frac{F^*}{m^*} \quad (17)$$

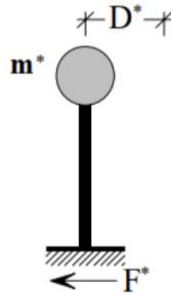


Figura 16. Simplificació de l'estructura al sistema equivalent SDOF [P. Fajfar, 1996].

5. Demanda sísmica pel sistema SDOF equivalent

La demanda sísmica pot determinar-se mitjançant un gràfic on s'hi dibuixen tant l'espectre de la demanda com el diagrama de capacitat. La intersecció de la recta radial (període elàstic del sistema bilineal) amb l'espectre de demanda elàstic defineix l'acceleració requerida per a un comportament elàstic i la demanda de desplaçament. Per tant, l'acceleració de plastificació S_{ay} representa tant l'acceleració demandada com la capacitat del sistema inelàstic.

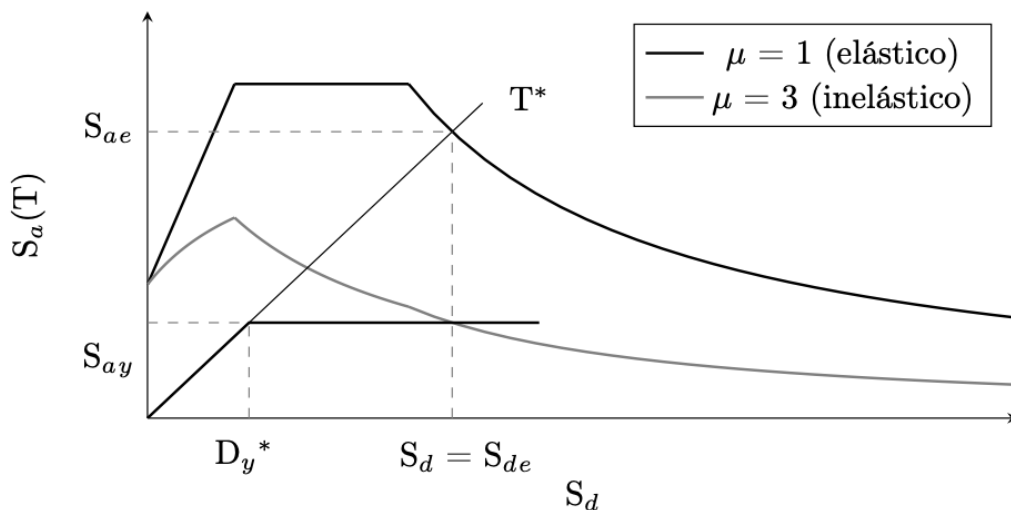


Figura 17. Exemple gràfic del mètode N2 per a un sistema SDOF [M. Sifón, 2016].

6. Demanda sísmica local i global del MDOF

La demanda del desplaçament del model d'una sola variable es transforma en desplaçament màxim del sistema de múltiples variables mitjançant l'equació (10). Assumint que la distribució de deformacions a l'estructura durant l'anàlisi d'empentes incrementals correspon al que s'hagués obtingut mitjançant anàlisi dinàmics, la demanda sísmica local es pot determinar a partir de l'anàlisi *pushover*.

La normativa recomana realitzar l'anàlisi per al menys el 150% del desplaçament objectiu donat que el valor màxim a la coberta representa una mitja per a la càrrega del sisme aplicada i convé investigar el desenvolupament de l'estructura per a valors superiors al desplaçament objectiu.

7. Avaluació del desenvolupament i anàlisi de danys

Pot avaluar-se el desenvolupament comparant les demandes sísmiques amb les capacitats obtingudes per a certs comportaments. Pot completar-se també a través de l'avaluació de plastificacions i danys dels diversos elements.

4.5.3. Eurocódigo 8

El Eurocódigo en general té com a criteri el disseny i càlcul estructural a partir de models CAD. En concret, l'Eurocódigo 8 és un projecte basat en l'estudi sísmic d'estructures. L'Annex Nacional d'aquest defineix les condicions d'aplicació al projecte d'estructures sismorresistents en el territori espanyol de la norma UNE-EN 1998-1:2011 (amb la seva modificació UNE-EN 1998-1:2011/A1:2013). En aquest annex es fixen els paràmetres de determinació nacional (NPD) que la norma deixa oberts per a ser establerts en cada país i tota aquella informació necessària per a dur a terme la implementació de la norma [M. Sifón, 2016].

4.5.4. Mètode de l'ajust del 10%

Aquest mètode es basa en la millora de l'ajust bilineal i va ser proposat per De Luca, Vamvatsikos i Iervolino [F. De Luca, 2011]. Té per finalitat reduir l'error comès a l'anàlisi pushover convencional mitjançant l'ajust lineal de la corba de capacitat.

L'aproximació es centra a la intersecció entre la corba de capacitat i el segment elàstic ajustat al 10% del valor del tallant màxim a la base de l'edifici per a poder captar millor la rigidesa inicial. Una altra característica important d'aquest mètode és la configuració d'un segment plàstic posterior al valor màxim del tallant. Com en el mètode N2, la demanda sísmica es representa mitjançant un espectre de resposta inelàstica, que resulta de l'escalat de la resposta elàstica dels espectres i l'ús de les relacions adequades entre les variables [J. Máca, 2015].

5. L'edifici

5.1. Models d'edificis

Els models d'edifici típics de l'Eixample segueixen patrons repetitius i estructures recolzades en murs de càrrega i pilars de maçoneria a la planta baixa. En general aquests edificis disposen dels elements necessaris per assegurar l'estabilitat de l'edifici que van generalment des de les 4 fins les 7 plantes d'alçada.

Els edificis centrals, situats a les bandes, solen ser rectangulars i els edificis de les cantonades més irregulars, amb una forma gairebé triangular donat que es troben al xamfrà (veure Figura 18).

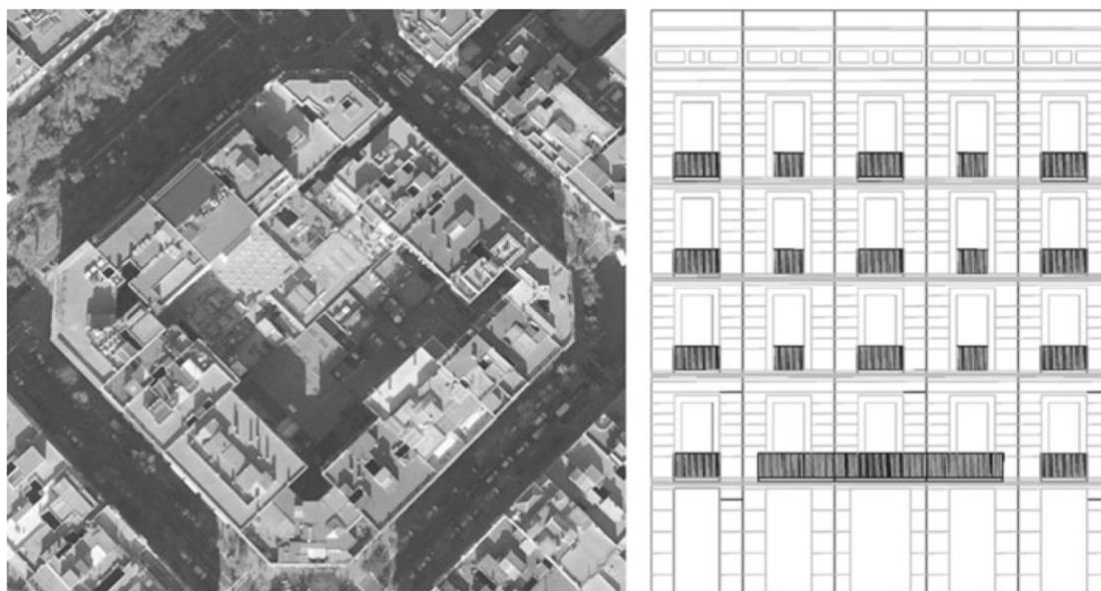


Figura 18. Vista aèria d'una illa de cases i dibuix d'una façana típiques de l'Eixample [L.G. Pujades et al., 2010].

Els edificis rectangulars es referencien amb els models C1 i C2 mentre que els edificis dels xamfrans es referencien amb els models E (veure Figura 19). La seqüència d'aquests models donen lloc a cadascuna de les cares de les illes de cases que formen l'Eixample [L. G. Pujades, 2010].

Es dotaven de mitgeres, és a dir, de parets laterals perpendiculars a la façana que generalment es compartien amb altres edificis. En aquests casos, sovint s'hi afegien nervis per a unir-se i actuar com a un sol mur, millorant així la seva capacitat davant forces externes.

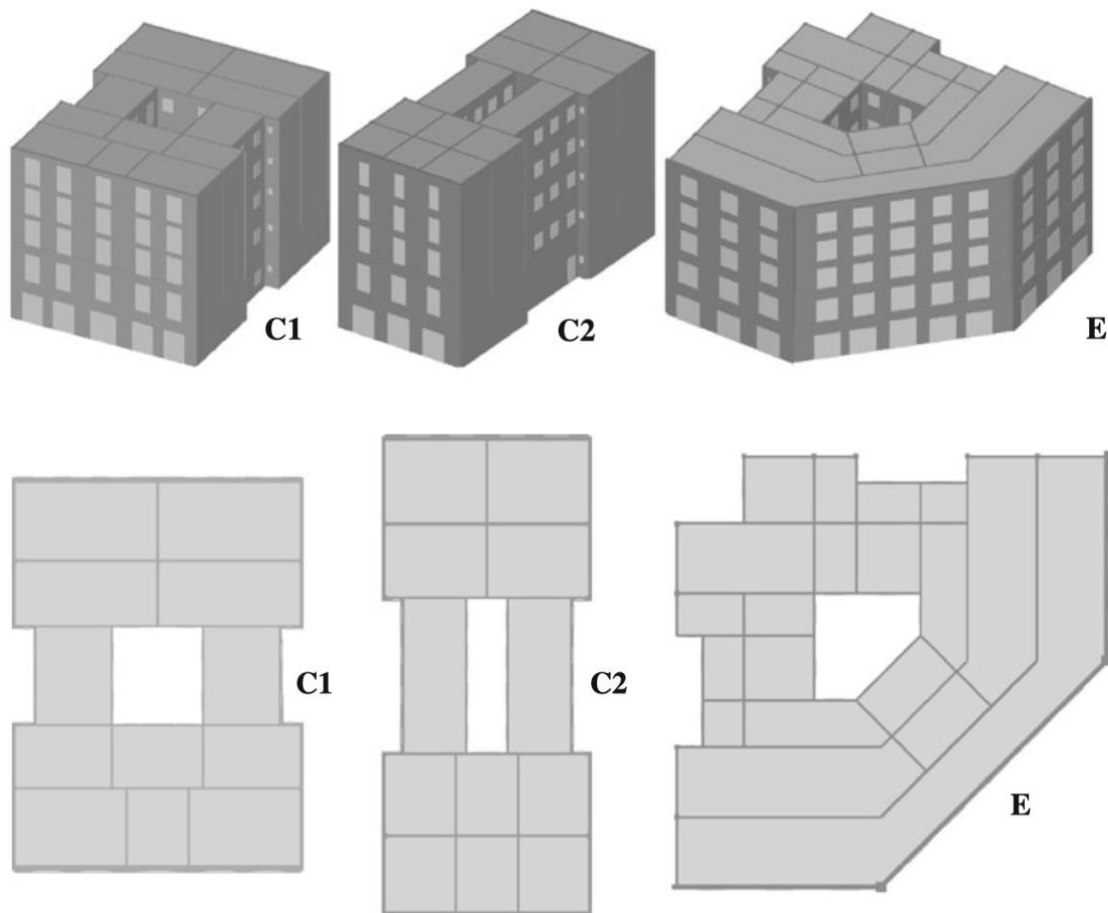


Figura 19. . Esquemes modelats i plantes dels tipus d'edificis C1, C2 i E [L.G. Pujades et al., 2010].

Els edificis centrals situats a les bandes es classifiquen en quatre tipus [C. Cornadó, 2015]:

- Segons la ubicació de l'escala de veïns, que pot ser central (tipus C) o adossada a mitgeres (tipus L).
- Segons l'existència de patis adossats a mitgeres a més dels patis centrals, anomenats C2x (o C1x si no existeixen aquests patis).
- Segons el nombre de patis en profunditat. Si només consten d'un pati, l'edifici s'anomena Cx1 i en cas de tenir-ne més d'un Cx2.
- Segons la direcció de l'embigat, que es troba directament influïda per l'existència de patis i la disposició de l'escala.

L'edifici d'estudi es tracta d'un edifici típic de l'Eixample construït entre finals del segle XIX i principis del segle XX. L'edifici es troba situat a la banda (per tant és central), amb dos patis centrals i patis a les mitgeres, de paredat no reforçat i consta de 7 pisos: una planta baixa i sis plantes per sobre (veure Figura 20).

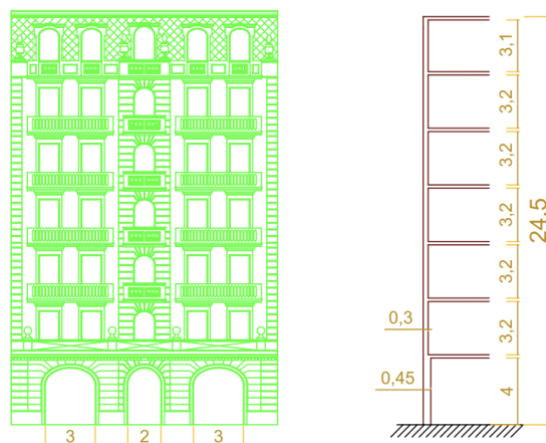


Figura 20. Dibuix CAD de la façana i l'alçada de l'edifici [J. Avila].

Totes les configuracions possibles on l'escala és central es troben resumides en el quadre a continuació:

ESCALA CENTRAL



Figura 21. Quadre resum tipus amb escala central [C. Cornadó, 2015].

Donada la distribució dels patis, observem que es tracta d'un edifici tipus C22B (veure Figura 22), on el tipus B indica una major profunditat edificada. El tipus C22 es dona en parcel·les amb majors extensions. L'amplada i la fondària és major que a altres tipus i tenen com a mínim dos patis centrals i patis en les mitgeres. La configuració dels murs és més complexa i és l'única configuració que permet la divisió de la planta en quatre habitatges.

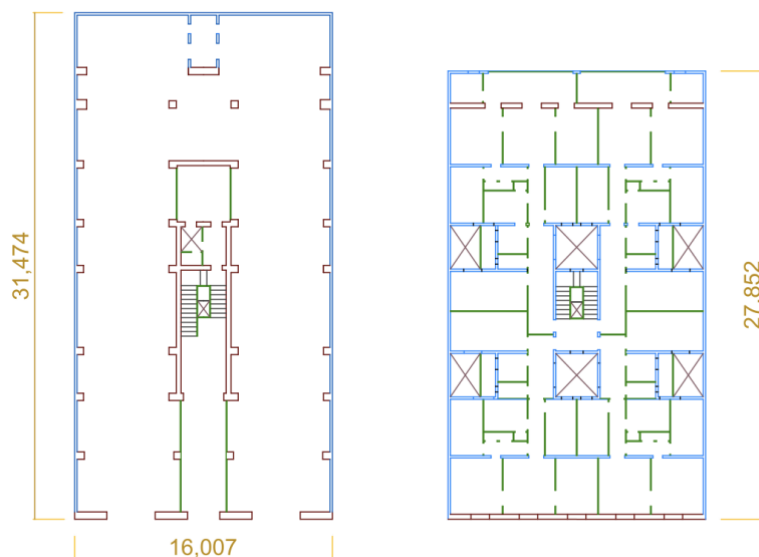


Figura 22. Dibuix CAD del soterrani i una planta tipus [J. Avila].

5.2. Característiques constructives

Les parets i terres de maçoneria assentada sobre morter són les principals tècniques amb que es van construir els edificis de l'Eixample. Aquests, juntament amb una mà d'obra capacitada van ser la base d'una bona construcció. L'element principal de les parets de maçoneria són els maons de ceràmica, la qual és el material bàsic de construcció del moment degut a la seva gran absorció de càrregues. Gràcies a la mà d'obra de qualitat de l'època, els maons, irregulars en forma i propietats, eren situats a l'edifici el funcionament de la seva qualitat, gruix i de la càrrega a suportar.

El procés de fabricació dels maons ha millorat amb els temps, augmentant la seva resistència i qualitat. Podem distingir dos grans canvis en la seva fabricació; el primer és el tipus de forn, començant amb forns de calor intermitent, que produïen maons o poc cuits o recremats, a forns Hoffman que proporcionaven una cocción més uniforme. La segona és la producció dels maons, partint d'una producció manual a una producció mecànica amb maons foradats que milloren la compactació del maó i en redueixen la porositat [A. Paricio, 2001].

Aquests murs de maó compten amb gruixos de 30, 45 o 60 centímetres a les façanes i de 15 a 30 centímetres pels altres murs. En general, els edificis compten amb tres murs principals: dos de les façanes i un altre paral·lel a la façana frontal.

Pel que fa als ciments del soterrani, s'utilitzaven pilar de fosa o jàsseres on recolzar els murs estructurals. Aquests pilars es recolzen en un bloc de maçoneria de morter de calç. Per les plantes més baixes, s'utilitzaven forjats de biguetes metàl·liques i revoltós ceràmics recolzats en pilars de fosa o jàsseres metàl·liques.

En general l'estructura de les plantes baixes i/o subterrànies es basen en un sistema isostàtic de pilars de fosa i jàsseres de fusta. Amb el temps s'hi van implementar perfils metàl·lics, un dels primers elements industrials inserits als edificis, que donaven suport a estructural a aquestes plantes i permetien zones diàfanes, com galeries i façanes interiors [A. Paricio, 2001].

6. Propietats materials

Per a un bon comportament sísmic les estructures han de mantenir la seva capacitat de càrrega per a deformacions superiors a la cadència de manera que la zona inelàstica pugui dissipar l'energia del sisme. En el cas de Barcelona, les estructures no van ser dissenyades tenint un compte una càrrega sísmica, només es va tenir en consideració l'efecte del vent i la gravetat [R.L. Bonett, 2003]. Les característiques materials tenen un paper important pel que fa al comportament de l'estructura davant el sisme.

Com ja hem esmentat anteriorment, els elements d'ús més comú en la construcció dels edificis de maçoneria no-reforçada de l'Eixample són les parets i els terres de maçoneria. Aquests elements estan formats per maons i morter. Hi ha variacions de les propietats mecàniques dels materials utilitzats en aquests edificis degut a variacions intrínseques de les propietats del morter de l'època, la qualitat dels maons i les condicions físiques i ambientals no controlades durant la fabricació d'aquests. Com aquest fet era conegut, en funció de l'espessor de les parets i la càrrega que aquestes devien suportar els maons i el morter, situant-se els de menor resistència on les càrregues son menor i els de major resistència als elements que suporten més càrrega [J. Máca, 2015].

6.1. Esforç a compressió, f_m

L'esforç o resistència a la compressió pren un ampli interval de valors en funció del material i el tipus d'unitat. En el cas dels maons, el valor de l'esforç a compressió oscil·la entre els 500 i els 2.000 T/m^2 i, segons estudis [R.L. Bonett, 2003] el seu comportament vers la deformació és lineal fins el moment de ruptura. Altres assajos sobre unitats de maçoneria reforçada [A.W. Hendry, 1990] proven que els maons foradats tenen un comportament molt fràgil i no es pot predir el comportament d'aquests, és per això que no es recomana la seva utilització a zones amb alt risc sísmic.



Figura 23. Representació de l'esforç a compressió [Font pròpia].

6.2. Mòdul de Young, E

El mòdul de Young és el mòdul secant de la recta obtinguda al tram elàstic del diagrama tensió-deformació i caracteritza el comportament elàstic del material. El rang de valors que pren el mòdul de Young és ampli i depèn bàsicament del tipus de material i de la resistència a tracció.

En el cas dels maons, aquest mòdul sol ser menor que pel formigó i, al contrari que aquest, es pot suposar que el comportament dels maons és similar al comportament d'un material elàstic lineal [R.L. Bonett, 2003].

6.3. Mòdul de rigidesa, G

També anomenat mòdul de cisallament, el mòdul de rigidesa és el quocient entre l'esforç tallant i la deformació angular que aquest produeix i està relacionat amb el mòdul de Young a través del coeficient de Poisson.

En materials elàstics lineals, com és el cas de la maçoneria, aquest quocient amb el pendent de la recta de tensió tangencial-deformació transversal en la direcció considerada.

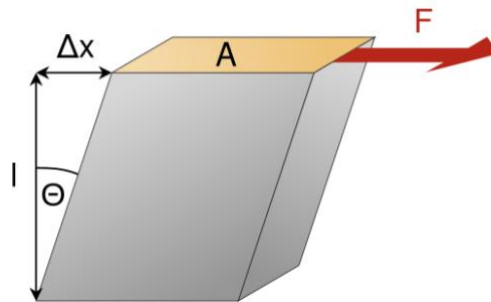


Figura 24. Esquema per a la mesura de l'esforç tallant sobre un cos [ca.wikipedia.org (27/12/2019)].

6.4. Esforç tallant, τ_0

L'esforç tallant o de cisallament és l'esforç que resulta de les tensions paral·leles a la secció transversal de l'estructura. Aquest esforç intern és el que manté la rigidesa de l'estructura.

6.5. Propietats materials d'estudi

L'esforç a compressió (f_m), el mòdul de Young (E), el mòdul de rigidesa (G) i l'esforç tallant (τ_0) són les propietats de la maçoneria que es prenen com a variables aleatòries. Pel que fa als valors de l'esforç de compressió, segueix una distribució normal amb un $\alpha=10\%$ i un interval de confiança del 90%, els valors crítics dels quals s'assemblen molt als límits superior i inferior d'aquest [J.A. Avila-Haro 2017].

S'assumeix una correlació lineal positiva entre cada variable i l'esforç de compressió, de manera que podem escriure cada variable com a funció de f_m (veure equació 18):

$$E = E(f_m, \varepsilon)$$

$$G = G(E, \varepsilon) \quad (18)$$

$$\tau_0 = \tau_0(f_m, \varepsilon)$$

On ε es una variable normal amb $\mu_\varepsilon=0$ i variància igual a 1, introduirà per tal de incloure la incertesa de la hipòtesi. Igualment, amb el propòsit d'ajustar la correlació en les diferents relacions i gener diferents mostres de la resta de propietats en funció de f_m , el paràmetre a és afegit a la igualtat segons l'equació 19:

$$E = 500f_m + a\varepsilon \quad (19)$$

On E , ε i f_m s'han definit anteriorment i a és el paràmetre variable d'ajust. En aquesta igualtat, el coeficient de correlació entre E i f_m és ρ :

$$\rho = \frac{\text{cov}(E, f_m)}{\sqrt{\text{var}(E)\text{var}(f_m)}} \quad (20)$$

On $\text{cov}(E, f_m)$ és la covariància entre E i f_m , i $\text{var}(E)$ i $\text{var}(f_m)$ són les variàncies de E i f_m respectivament.

Per a una mostra de f_m donada, la variància d' E es pot calcular com a :

$$\text{var}(E) = \text{var}(500f_m + a\varepsilon) = 500^2\text{var}(f_m) + a^2\text{var}(\varepsilon) \quad (21)$$

Aïllant l'expressió anterior adequadament, calculem la covariància entre E i f_m es pot calcular més fàcilment com:

$$\text{cov}(E, f_m) = \text{cov}[(500f_m + a\varepsilon), f_m] = 500\text{var}(f_m) + a \cdot \text{cov}(\varepsilon, f_m) = 500\text{var}(f_m) \quad (22)$$

Conseqüentment, el coeficient de correlació es pot escriure en termes del paràmetre a i aïllant de l'expressió (23) trobem:

$$a = \frac{500\sqrt{\text{var}(f_m)}}{\sqrt{\text{var}(\varepsilon)}} \sqrt{\frac{1}{\rho^2} - 1} \quad (23)$$

Seguint el mateix procediment pel mòdul de Young, els valors del mòdul de rigidesa i l'esforç tallant es poden generar mitjançant les següents relacions (veure equacions 24 i 25).

$$G = \frac{1}{3}E + b\varepsilon \quad (24)$$

$$\tau_0 = 0,03f_m + c\varepsilon \quad (25)$$

On els paràmetres b i c s'utilitzen com a paràmetres d'ajust de correlació entre G i E , i τ_0 i f_m respectivament.

7. Estats de dany

El nivell de dany induït que presenta una estructura després de ser sotmesa a un terratrèmol pot ser identificada i classificada a través dels denominats *estats de dany* (*DS-Damage States*).

Existeixen diferents tipus d'estats de dany d'acord a l'escala en que s'avalua el dany. Així mateix, una correcta interpretació dels mateixos permet determinar el nivell de desenvolupament de l'estructura amb la finalitat de dur a terme la presa de decisions i accions.

Per aquest treball s'ha utilitzat el criteri proposat en el document RISK-UE [Milutinovic & Trendafiloski, 2003], el qual considera l'existència de quatre estats de dany no nuls (DS_1 - lleuger, DS_2 - moderat, DS_3 - extens i DS_4 - col·lapsat) i un estat de dany nul (DS_0) (veure Taula 2).

Els estats de dany anomenats anteriorment queden definits a partir dels punts de fluència (Δ_y) i últim (Δ_u) obtinguts en la representació bilineal de la corba de capacitat de l'estructura.

Tabla 2. Llíders dels estats de dany RISK-UE [Z.V. Milutinovic et al., 2003].

Estat de dany (DS)	Definició	Descripció	Límits desplaçament espectral (S_d)
DS_0	Dany nul	No existeix dany	$\Delta < 0.7 \cdot \Delta_y$
DS_1	Dany lleuger	Dany despreciable o lleuger	$0.7 \cdot \Delta_y \leq \Delta < \Delta_y$
DS_2	Dany moderat	Dany estructural lleuger, dany no estructural moderat	$\Delta_y \leq \Delta < (\Delta_y + \Delta_{uy})$
DS_3	Dany extens	Dany estructural moderat, dany no estructural elevat	$(\Delta_y + \Delta_{uy}) \leq \Delta < \Delta_u$
DS_4	Dany complet	Dany estructural elevat, dany no estructural molt elevat, col·lapse total o proper a total	$\Delta_u \leq \Delta$

On: $\Delta_{uy} = 0.25 \cdot (\Delta_u - \Delta_y)$

7.1. Fragilitat

Les funcions o corbes de fragilitat permeten representar la probabilitat d'aconseguir o excedir un determinat estat de dany (DS) en termes d'una mesura d'intensitat (IM, *intensity measure*) prèviament seleccionat, que per a aquest treball és el desplaçament espectral (S_d). Basats en observacions i

experimentació prèvia, s'assumeix que per als estats de dany no nul·les (DS_1 a DS_4) les corbes de fragilitat segueixen una distribució del tipus lognormal cumulativa (equació 26) [J:W: Baker, 2014].

$$P(ds_i|IM) = \Phi\left(\frac{1}{\beta_{ds_i}} \ln\left[\frac{IM}{IM_{ds_i}}\right]\right) \quad (26)$$

On:

$P(ds_i IM)$	és la probabilitat de que un IM ocasioni que l'estructura arribi a un estat de dany ds_i ,
Φ	es la funció de distribució normal cumulativa
IM_{ds_i}	és el valor mig de la funció de fragilitat
β_{ds_i}	és la desviació es`tandard del $\ln(IM)$

Amb la finalitat de facilitar la comparativa entre els resultats obtinguts per la població total de models estructurals analitzats ($N=1000$) i la mostra escollida ($n=278$), s'han seleccionat com a paràmetres de sortida dels desplaçaments en format espectral corresponents als punts de fluència (S_{dy}) i últim (S_{du}) de la representació bilineal de la capacitat de l'estructura, els estats de dany no-nuls (DS_1 , DS_2 , DS_3 i DS_4), així com les probabilitats d'excedència dels esmentats estats de dany. A continuació, es presenten els diversos paràmetres i valors calculats a partir de la resposta estructural de cadascun dels models analitzats, així com la influència de les variables aleatòries d'entrada.

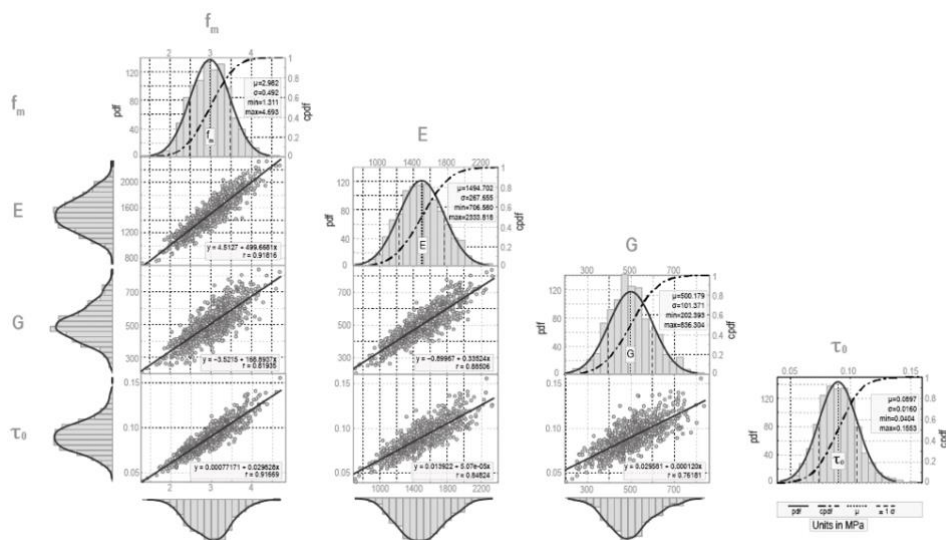
8. Població

El procediment anteriorment explicat permet generar conjunts de propietats mecàniques relatives a una mateixa estructura. Per tal de ser el màxim extensos possible i assegurar-nos de cobrir tota la possible variabilitat, s'han generat de manera aleatòria i seguint una distribució normal una població de $N=1000$ conjunts de variables de propietats mecàniques. Els valors de les propietats (veure taula 3) presos en aquest estudi estan extrets del conjunt de variables fetes servir per J. A. Avila-Haro, R. González-Drigo, L. G. Pujades i A. Barbat a l'article "Probabilistic Seismic Damage Assessment of URM Buildings Based on Incremental Dynamic Analysis" i basats en diverses fonts d'informació per tal de ser fiables [J.A. Avila, 2017].

Tabla 3. Comparativa de la mitjana i la desviació estàndard dels valors objectius i dels valors de la població [J.A. Avila et al., 2017].

Variable	Valor objectiu		Valor generat	
	μ	σ	μ	σ
f_m	3.00	0.515	2.982	0.492
E	1500	257.58	1494.71	267.81
G	500	85.86	500.18	101.44
τ_0	0.09	0.016	0.0897	0.016

Unitats en Mpa.



Unitats en MPa.

Figura 25. Matriu de propietats mecàniques que inclou histogrames corresponents a la funció densitat de la distribució normal de cada propietat i regressions lineals i coeficients de correlació per a cada combinació de les propietats [J.A. Avila et al., 2017].

9. Mostra

El mostreig d'una població és un procés que consisteix en prendre un subgrup d'individus representatius de tota la població i ha de ser suficientment gran com per a garantir un bon anàlisi estadístic [J.A. Avila et al., 2017].

Degut a la mida de la població, l'anàlisi de cada unitat que la compona es poc pràctic i sovint impossible. Una alternativa més factible consisteix en l'estudi, anomenat mostreig, d'una mostra representativa i apropiada del conjunt de població d'interès, la qual permetrà aplicar a la població les conclusions extretes amb precisió i optimitzant la càrrega de feina i recursos.

En el nostre cas hem escollit el mètode de mostreig aleatori simple. Aquest mètode anomenat també *SRS (Simple Random Sampling)* considera que tots els individus d'una població tenen la mateixa probabilitat de ser escollits i totes les mostres de la mateixa mida són igual de probables.

Per a calcular la mida n de la mostra associada a una població finita N es duu a terme assumint una mateixa proporció de mostra del 50% p , un marge d'error del 5% i un interval de confiança del 95% ($\alpha=5\%$) els quals són considerats a l'equació (27).

$$n_0 = \frac{(p(1-p))}{\left(\frac{\text{error marge}}{z_{\text{confianza}}}\right)^2} \quad (27)$$

On n_0 és la mida de la mostra sense considerar el factor de correcció de població finita (FPC) i $z_{\text{confianza}}$ és el valor de la z corresponent quan $\alpha=5\%$ segons la taula de distribució normal. Aquest s'emptra per corregir l'error estàndard quan la mostra seleccionada d'una població finita sense reemplaçament i és més gran que el 5% (o més) de la població. Aquest factor es té en compte a les equacions (28) i (29):

$$\sqrt{n} = \sqrt{n_0} \cdot FPC \quad (28)$$

$$FPC = \sqrt{\frac{N-n}{N-1}} \quad (29)$$

Per finalment arribar a l'equació 30:

$$n = \frac{n_0 \cdot N}{(N-1) + n_0} \quad (30)$$

On n és la mida corregida de la mostra a utilitzar. El valor de n obtingut per a una població de $N=1000$ valors és $n=278$.

Per tal de verificar que la mostra obtinguda per a l'esforç de compressió f_m prové d'una distribució normal de la població amb paràmetres $\mu=2.982$ MPa i $\sigma=0,492$ MPa, s'ha dut a terme la prova de Kolmogorov-Smirnov amb un nivell de significança del 5% [J.A. Avila et al., 2017].

10. Càlculs i resultats

10.1. Corbes de capacitat

A continuació es mostren les corbes de capacitat i els seus corresponents espectres (Figures 26, 27, 28 i 29), tant de la població com de la mostra. Les corbes de capacitat s'han elaborat amb Matlab mitjançant les dades obtingudes de 3Muri. Seguidament s'adjunten les taules resum (Taules 4 i 5) de les diferents propietats associades a les corbes de capacitat en tres punts que la defineixen per tal de comprar-les més endavant. Aquests punts són el punt de fluència, el punt on es troba el màxim tallant basal i el punt últim on la capacitat s'esgota.

10.1.1. Corba de capacitat de la població

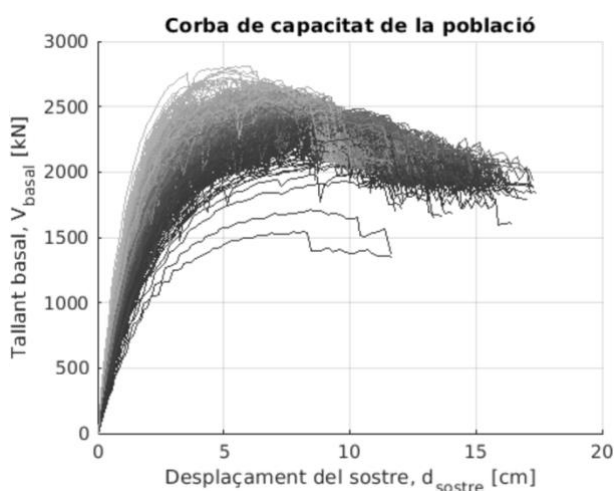


Figura 27. Corba pushover de la població [Font pròpia].

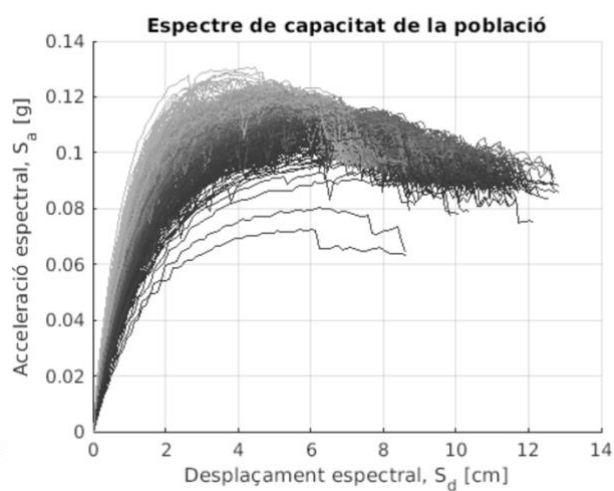


Figura 26. Corba espectre ADRS de la corba pushover de la població [Font pròpia].

Tabla 4. Taula de propietats de la corba pushover de la població [Font pròpia].

Mesurament	Punt	Mitjana	Mediana	Desviació estàndard	Mínim	Màxim
Desplaçament [cm]	Fluència	0,45	0,43	0,14	0,13	1,04
	Punt últim	11,84	11,79	1,90	2,52	17,37
	Màx. tallant	7,56	7,49	0,93	2,41	11,29
Tallant Base [kN]	Fluència	561,55	557,28	150,02	159,19	1006,11
	Punt últim	2014,69	2027,54	104,09	1342,28	2391,73
	Màx. Tallant	2480,69	2494,26	115,96	1544,34	2811,51

10.1.2. Corba de capacitat de la mostra

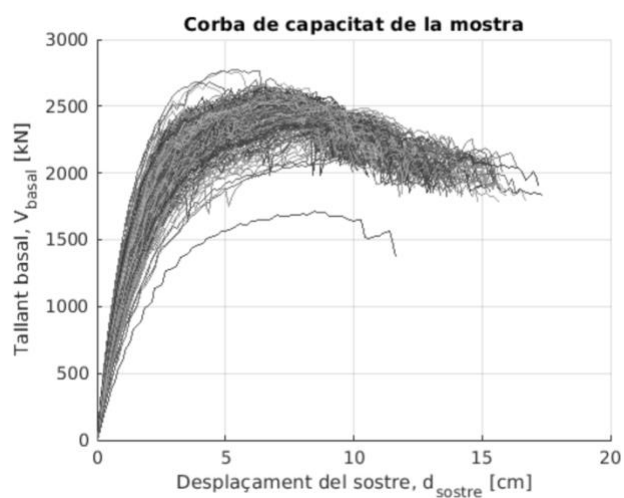


Figura 29. Corba pushover de la mostra [Font pròpia].

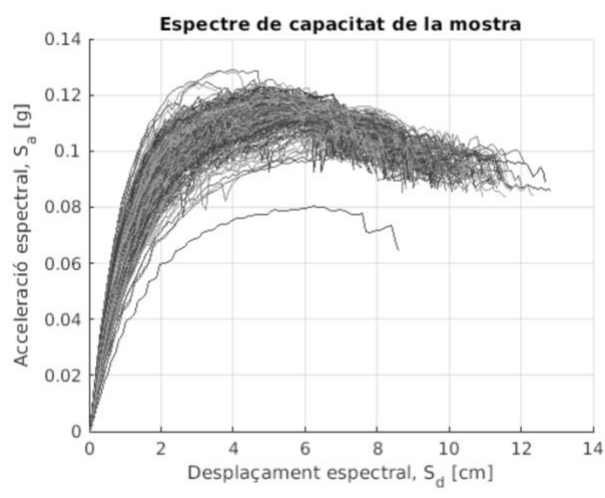


Figura 28. Corba espectre ADRS de la corba pushover de la mostra [Font pròpia].

Tabla 5. Taula de propietats de la corba pushover de la població [Font pròpia].

Mesurament	Punt	Mitjana	Mediana	Desviació estàndard	Mínim	Màxim
Desplaçament [cm]	Fluència	0,443	0,406	0,145	0,137	0,735
	Punt últim	11,877	11,828	2,009	2,522	17,369
	Màx. tallant	7,569	7,491	0,973	2,411	10,598
Tallant Base [kN]	Fluència	557,242	538,009	151,964	249,613	904,588
	Punt últim	2017,005	2031,304	102,787	1368,925	2353,188
	Màx. Tallant	2459,667	2496,946	114,164	1711,156	2772,989

10.2. Histograma del punt de fluència i del punt últim

A continuació es mostren els histogrames del punt de fluència i del punt últim, donat que són els dos punts de referència per a la construcció de les corbes bilineals i els punts que determinen els nivells de dany.

Considerem el punt últim com la dada d'estudi més rellevant donat que, com s'ha esmentat anteriorment, és la que ens determina el nivell de dany més elevat. Donat que 3Muri segueix proporcionant dades un cop l'estructura s'esgota i per tant és difícil de determinar el punt últim, prenem el criteri d'establir el punt últim com aquell que es correspon al 80% de la força tallant màxima per tal de no induir a errors.

En aquest punt es mostren els histogrames del punt de fluència i últim de la població i la mostra. En aquests histogrames es representa la freqüència dels punts per a cada variable generada pel programa 3Muri. Al centre de la figura es mostra un diagrama de dispersió amb la representació del desplaçament del punt de fluència o el punt últim respecte l'estat de repòs de l'estructura per a cada valor. A l'esquerra d'aquest l'histograma amb la freqüència de cada valor. En comparar ambdós histogrames observem que pels dos casos de població i mostra el desplaçament del punt últim ronda els 12 centímetres i els 0,45 centímetres pel punt de fluència.

10.2.1. Histograma del punt de fluència i últim de la població

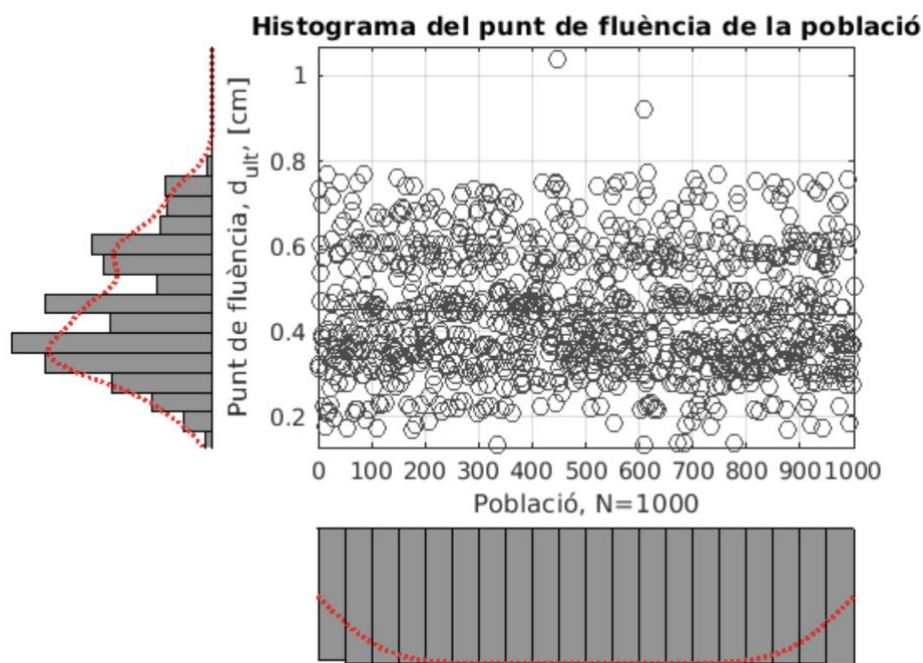


Figura 30. Histograma dels punts de fluència de la població [Font pròpia].

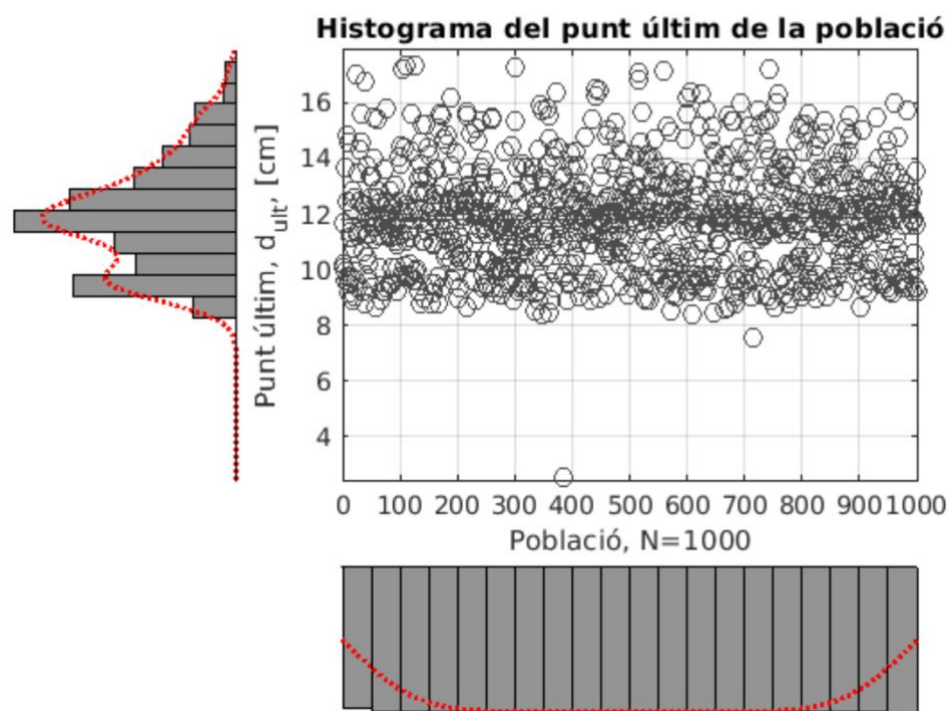


Figura 31. Histograma dels punts últims de la població [Font pròpia].

10.2.2. Histograma del punt de fluència i últim de la mostra

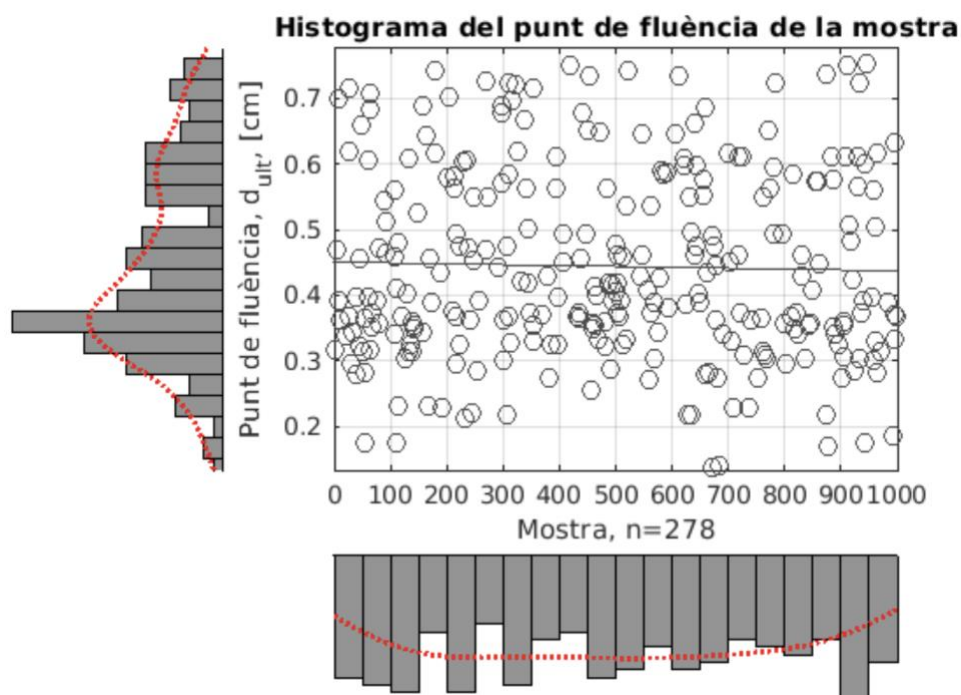


Figura 32. Histograma dels punts de fluència de la mostra [Font pròpia].

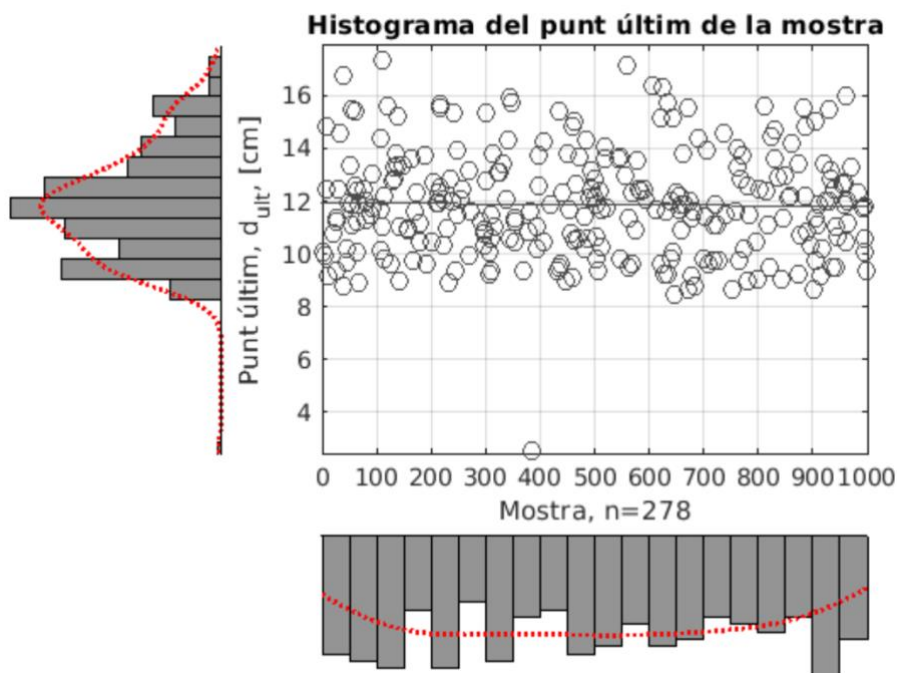


Figura 33. Histograma dels punts últims de la població [Font pròpia].

10.3. Corbes bilineals

Seguidament es mostraran les corbes bilineals de capacitat, calculades segons els quatre mètodes esmentats anteriorment: el CSM, l'N2, l'EC8 i el mètode de l'ajust del 10%. Aquestes corbes són capaces de representar la corba de capacitat amb dues línies i l'àrea sota aquestes ha de ser equivalent a l'àrea de les corbes de capacitat.

Seguidament es mostraran les mateixes propietats de l'apartat 9.1, aquest cop de les corbes bilineals per a dos punts: el de fluència i el punt últim. Aquests valors es troben en acceleració i desplaçament espectral.

10.3.1. Corba bilineal pel mètode de l'Espectre de Capacitat

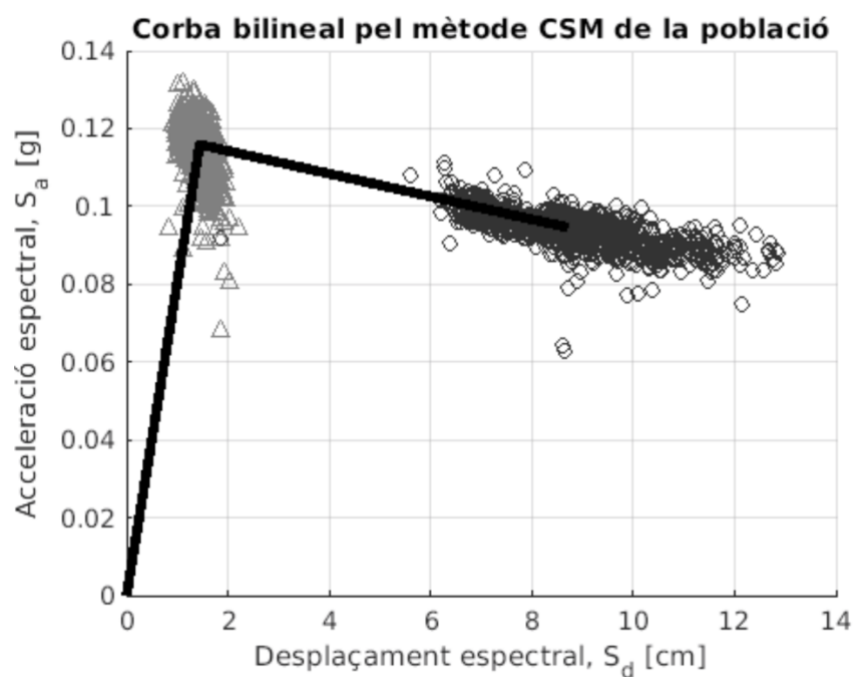


Figura 34. Corba bilineal pel CSM de la població [Font pròpia].

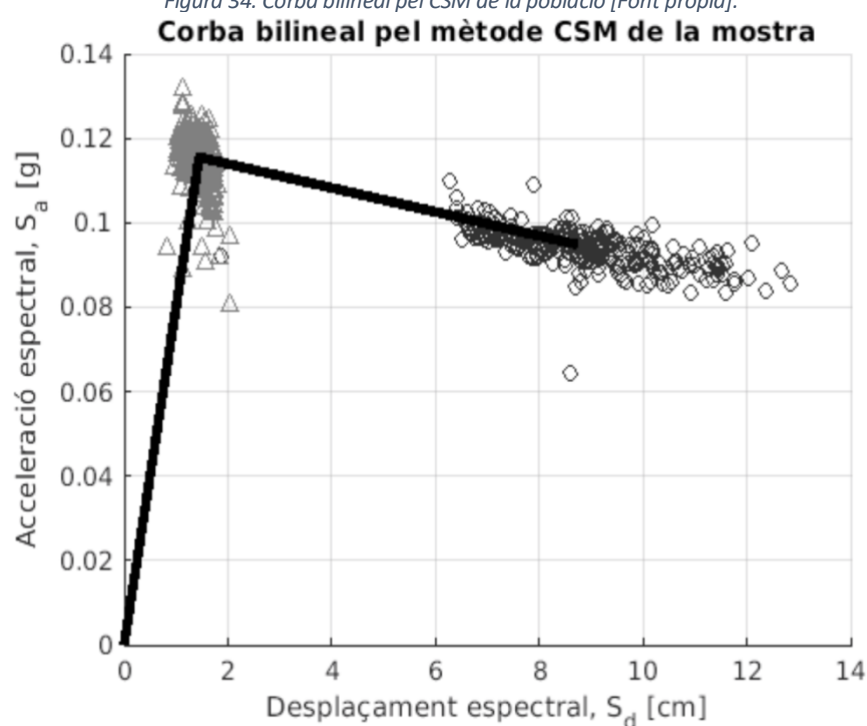


Figura 35. Corba bilineal pel CSM de la mostra [Font pròpia].

10.3.2. Corba bilineal pel mètode N2

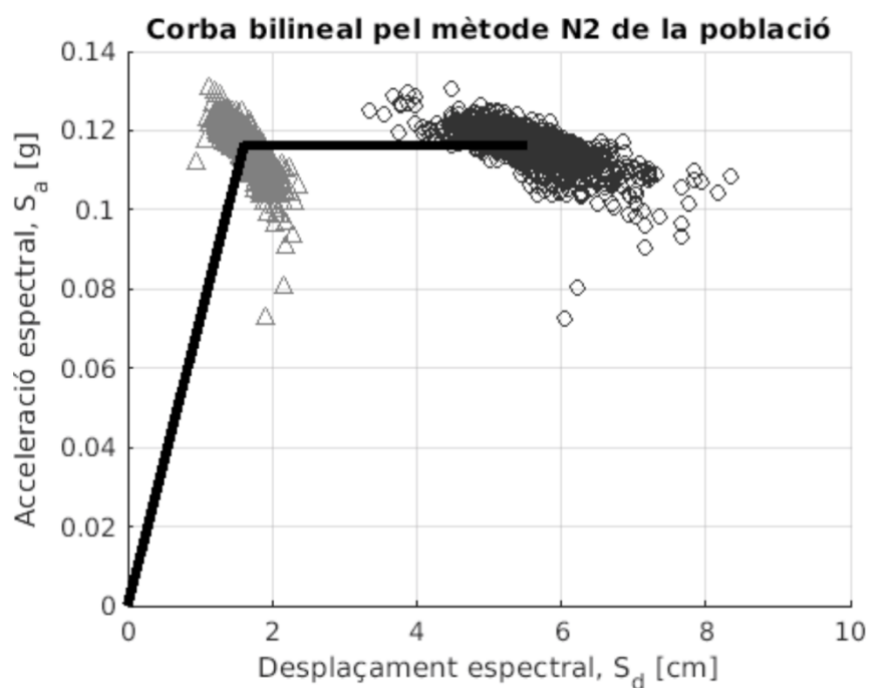


Figura 36. Corba bilineal per l'N2 de la població [Font pròpia].

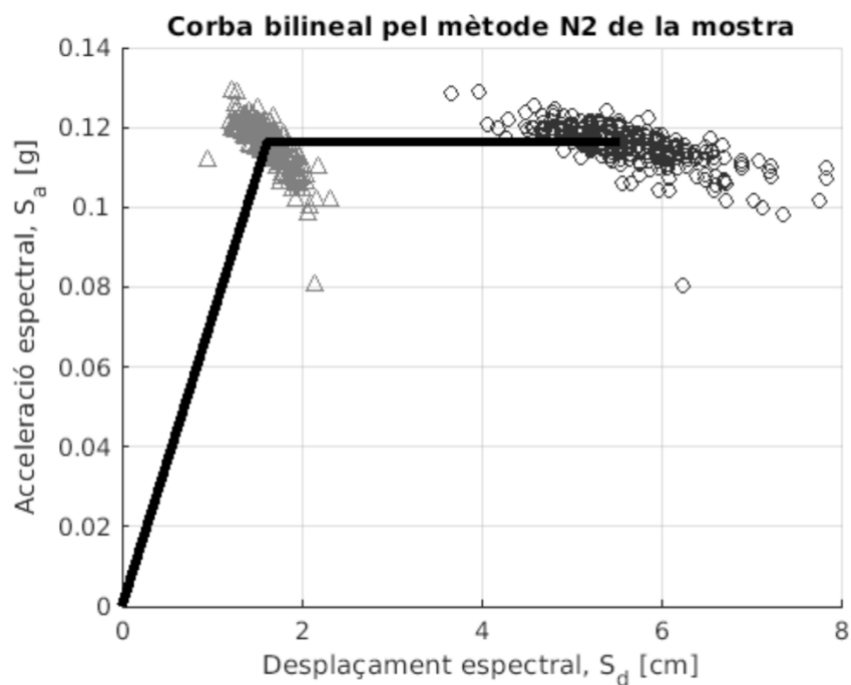


Figura 37. Corba bilineal per l'N2 de la mostra [Font pròpia].

10.3.3. Corba bilineal segons l'Eurocodigo 8

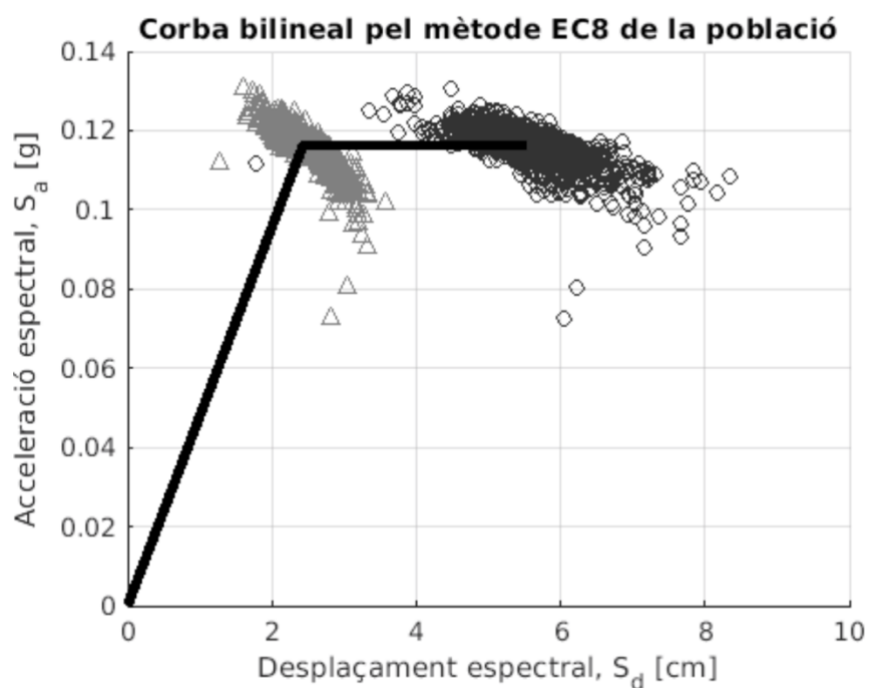


Figura 38. Corba bilineal segons l'Eurocodigo 8 de la població [Font pròpia].

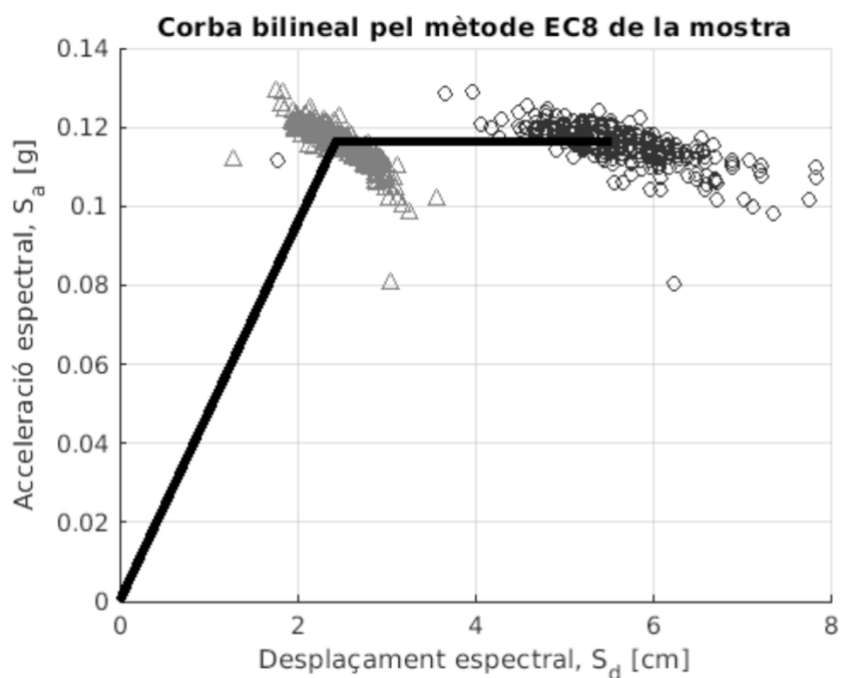


Figura 39. Corba bilineal segons l'Eurocodigo 8 de la mostra [Font pròpia].

10.3.4. Corba bilineal segons el mètode d'ajust del 10%

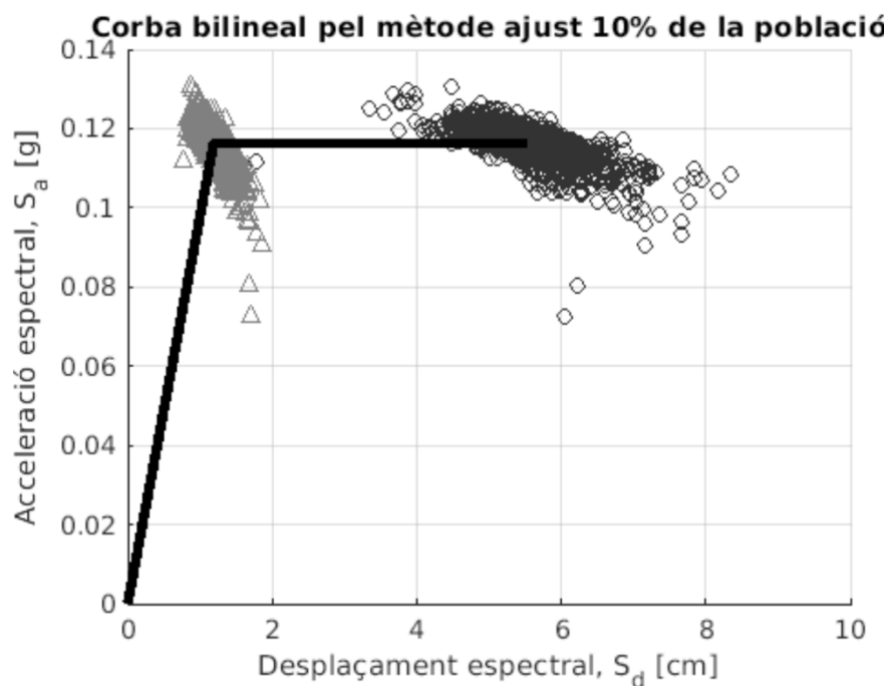


Figura 40. Corba bilineal segons el mètode d'ajust del 10% per a la població [Font pròpia].

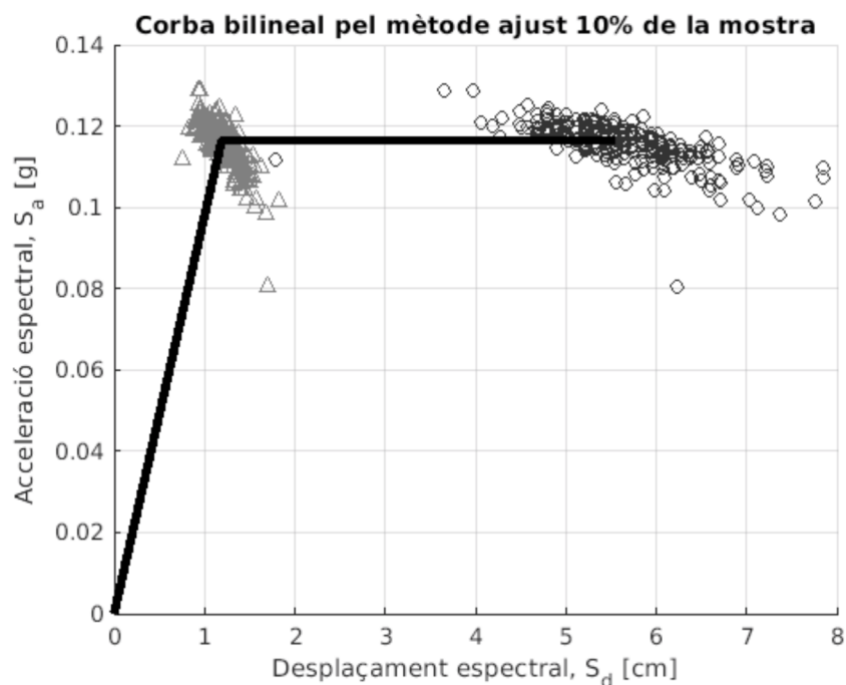


Figura 41. Corba bilineal segons el mètode d'ajust del 10% per a la mostra [Font pròpia].

10.3.5. Taula de propietats de les corbes bilineals

Com comentarem més endavant, el mètode CSM no està dissenyat per estructures de maçoneria no-reforçada i els seus resultats disten molt de la resta de mètodes i per tal quedarà descartat, raó per la qual els seus valors es troben en vermell.

Tabla 6. Taula de propietats de les corbes bilineals de la població [Font pròpia].

NSP	Mesurament	Punt	Mitjana	Mediana	Desv.est.	Mín.	Màx.
CSM	Desplaçament espectral [cm]	P. Fluència	1,430	1,443	0,206	0,814	2,208
		P. Últim	8,757	8,718	1,398	1,869	12,839
	Acceleració espectral [g]	P. Fluència	0,115	0,116	0,006	0,068	0,132
		P. Últim	0,094	0,095	0,005	0,063	0,111
N2	Desplaçament espectral [cm]	P. Fluència	1,620	1,609	0,206	0,958	2,365
		P. Últim	5,590	5,540	0,688	1,786	8,352
	Acceleració espectral [g]	P. Fluència	0,116	0,116	0,005	0,073	0,130
		P. Últim	0,116	0,116	0,005	0,073	0,130
EC8	Desplaçament espectral [cm]	P. Fluència	2,467	2,432	0,323	1,276	3,564
		P. Últim	5,590	5,540	0,688	1,786	8,352
	Acceleració espectral [g]	P. Fluència	0,116	0,116	0,005	0,073	0,130
		P. Últim	0,116	0,116	0,005	0,073	0,130
10%-Fit	Desplaçament espectral [cm]	P. Fluència	1,196	1,190	0,167	0,760	1,850
		P. Últim	5,590	5,540	0,688	1,786	8,352
	Acceleració espectral [g]	P. Fluència	0,116	0,116	0,005	0,073	0,130
		P. Últim	0,116	0,116	0,005	0,073	0,130

Tabla 7. Taula de propietats de les corbes bilineals de la mostra [Font pròpia].

NSP	Mesurament	Punt	Mitjana	Mediana	Desv.est.	Mín.	Màx.
CSM	Desplaçament espectral [cm]	P. Fluència	1,432	1,446	0,204	0,814	2,027
		P. Últim	8,785	8,747	1,479	1,869	12,826
	Acceleració espectral [g]	P. Fluència	0,114	0,115	0,007	0,080	0,132
		P. Últim	0,094	0,095	0,005	0,064	0,110
N2	Desplaçament espectral [cm]	P. Fluència	1,626	1,618	0,203	0,958	2,317
		P. Últim	5,599	5,541	0,717	1,786	7,844
	Acceleració espectral [g]	P. Fluència	0,116	0,116	0,005	0,080	0,129
		P. Últim	0,116	0,116	0,005	0,080	0,129
EC8	Desplaçament espectral [cm]	P. Fluència	2,476	2,436	0,321	1,276	3,564
		P. Últim	5,599	5,541	0,717	1,786	7,844
	Acceleració espectral [g]	P. Fluència	0,116	0,116	0,005	0,080	0,129
		P. Últim	0,116	0,116	0,005	0,080	0,129
10%-Fit	Desplaçament espectral [cm]	P. Fluència	1,202	1,190	0,166	0,760	1,820
		P. Últim	5,599	5,541	0,717	1,786	7,844
	Acceleració espectral [g]	P. Fluència	0,116	0,116	0,005	0,080	0,129
		P. Últim	0,116	0,116	0,005	0,080	0,129

10.4. Fragilitat

A continuació es mostren les corbes de fragilitat per a cada estat de dany en una mateixa gràfica (Figura 44) i una figura on s'adjunten les diferents probabilitats que té un determinat dany d'ocórrer en funció del desplaçament espectral segons el mètode N2. En aquest conjunt de figures es veu d'una manera més intuïtiva a quin nivell de desplaçament hi ha més probabilitat que ocorri cada dany en concret.

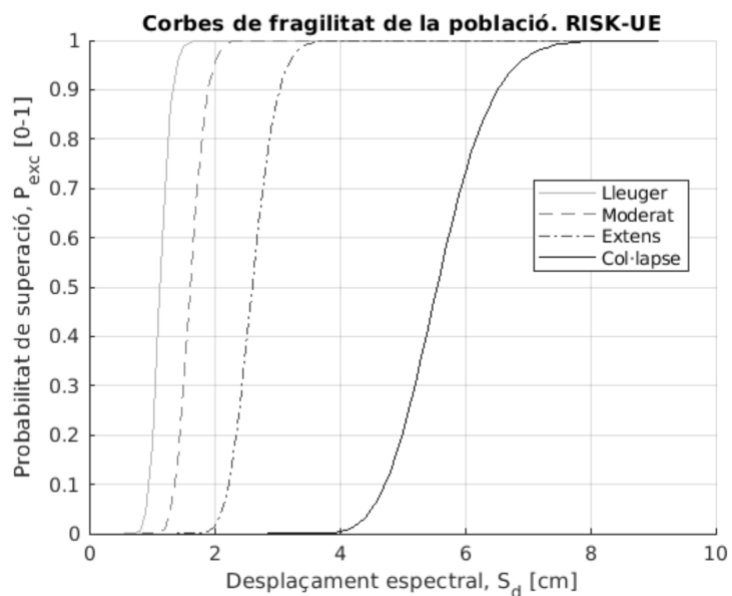


Figura 42. Corbes de fragilitat dels estats de dany de la població [Font pròpia].

Com s'observa en la figura 42 i amb més claredat a la figura 43, conforme tenim majors desplaçaments passem a estats de dany superiors.

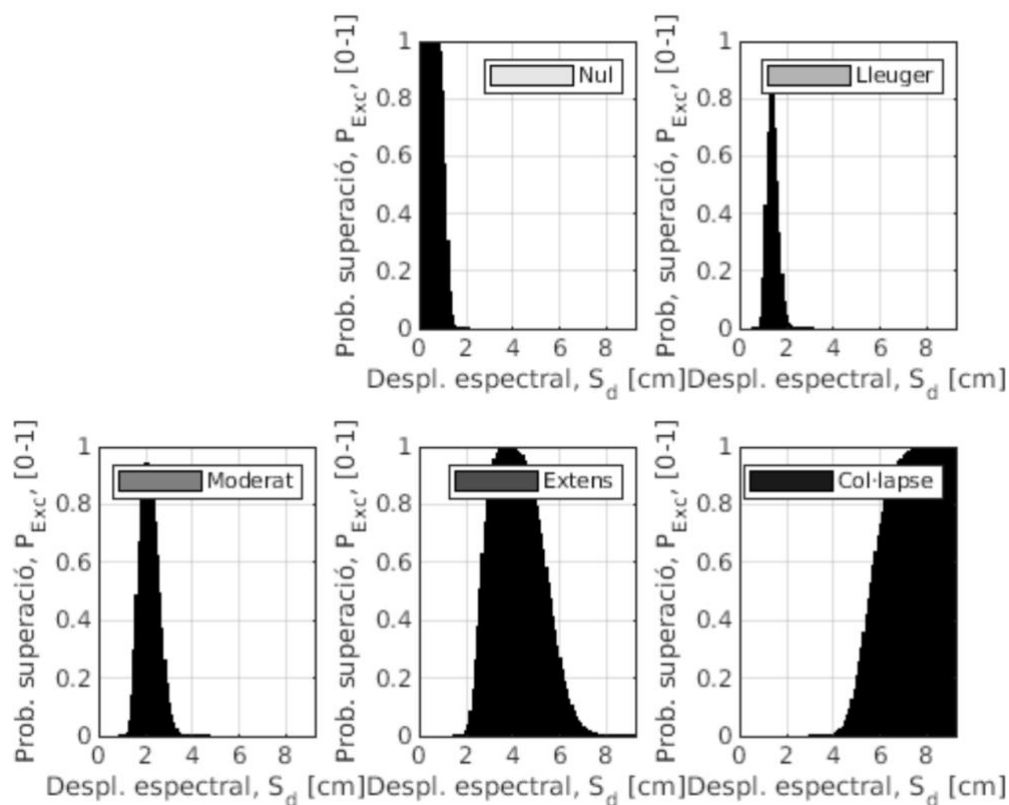


Figura 43. Distribucions de les probabilitats de superació de cada estat de dany segons el desplaçament espectral de la població [Font pròpia].

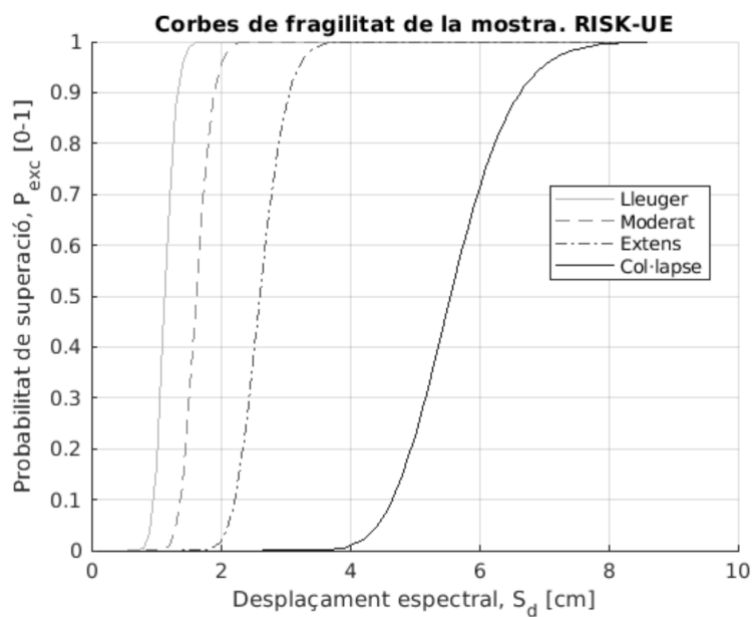


Figura 44. Corbes de fragilitat dels estats de dany de la mostra [Font pròpia].

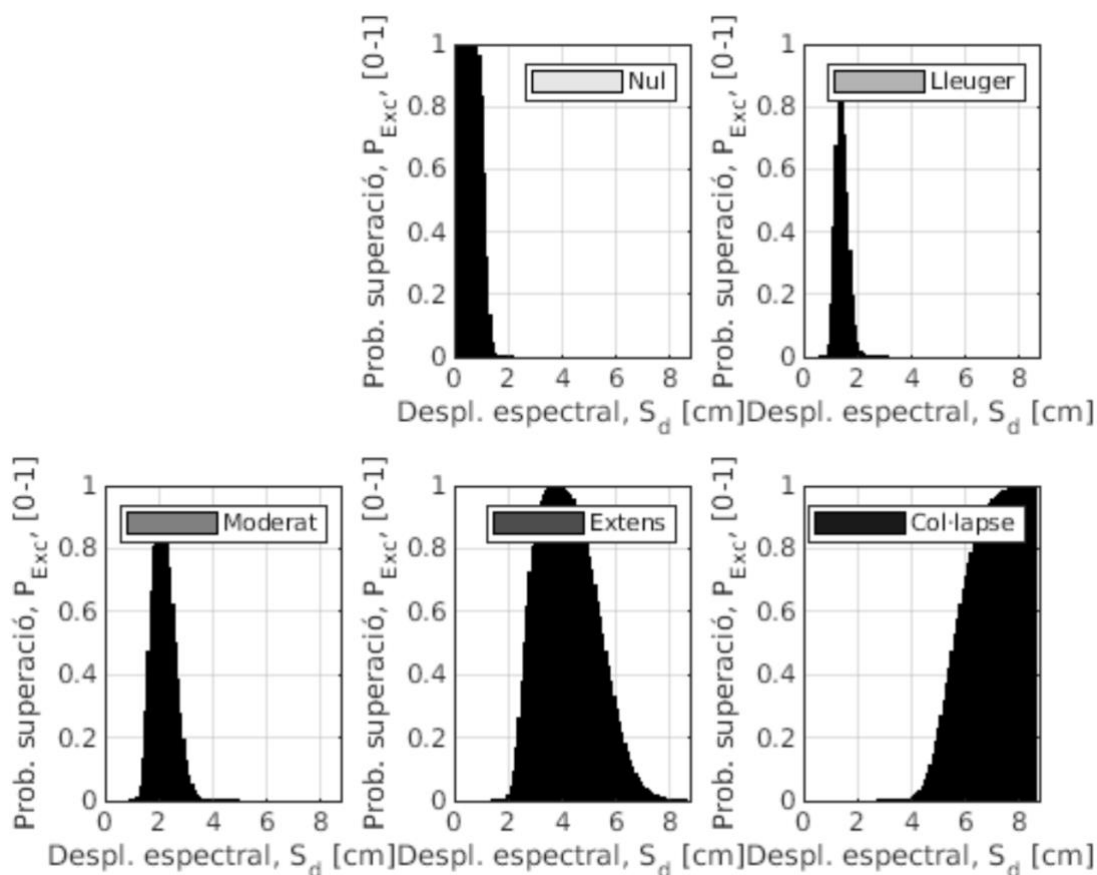


Figura 45. Distributions de les probabilitats de superació de cada estat de dany segons el desplaçament espectral de la mostra [Font pròpia].

10.5. Estats de dany

Seguidament es mostra la taula de propietats de les distribucions per a cada estat de dany (Taules 8 i 9). Aquestes propietats ens defineixen les distribucions de les probabilitats de superació de cada estat de dany (Figura 45 i 47).

Tabla 8. Propietats dels estats de dany de la població [Font pròpia].

Estat de dany	Mitjana	Mediana	Desv.est.	Mín.	Màx.
DS₁	1,13	1,13	0,14	0,67	1,66
DS₂	1,62	1,61	0,21	0,96	2,37
DS₃	2,61	2,59	0,31	1,17	3,69
DS₄	5,59	5,52	0,69	1,79	8,35

Unitats en [cm].

Tabla 9. Propietats dels estats de dany de la mostra [Font pròpia].

Estat de dany	Mitjana	Mediana	Desv.est.	Mín.	Màx.
DS₁	1,14	1,13	0,14	0,67	1,62
DS₂	1,63	1,62	0,20	0,96	2,32
DS₃	2,62	2,60	0,32	1,17	3,68
DS₄	5,60	5,54	0,72	1,79	7,84

10.6. Correlació dels valors d'entrada en front els resultats

A continuació es mostren els resultats de correlació, és a dir, la força i direcció de la relació lineal i la proporcionalitat que pugui existir entre les propietats materials i el desplaçament i acceleració espectrals pels punts de fluència i últim i els estats de dany i les probabilitats de que aquests passin. Com hem esmentat anteriorment, ens basem en el mètode N2 degut a la seva adequació amb l'estructura d'estudi, tal i com queda provat als càlculs, i és per això que els resultats estan obtinguts exclusivament per aquest mètode. Gràcies a aquestes correlacions, mostrades en forma de matriu, podrem establir una relació de les diferents propietats materials, tant entre elles, com amb l'espectre de capacitat a través del desplaçament i acceleració espectrals. Aquests últims s'han pres de les corbes de capacitat bilineals donat a la simplicitat que tenen envers les corbes de capacitat obtingudes de 3Muri.

En vermell es mostren les correlacions més altes entre paràmetres de la mateixa categoria.

10.6.1. Correlació pel mètode N2 entre les propietats físiques i el desplaçament i acceleració espectrals pels punts de fluència i últim

Tabla 10. Matriu de correlació entre propietats i desplaçament i acceleració espectral de la població [Font pròpia].

	f_m	E	G	τ_0	Sd_y	Sd_u	Sa_y	Sa_u	
f_m	1,000	0,918	0,819	0,917	-0,892	-0,774	0,893	0,893	f_m
E		1,000	0,885	0,848	-0,948	-0,781	0,822	0,822	E
G			1,000	0,762	-0,916	-0,712	0,744	0,744	G
τ_0				1,000	-0,856	-0,754	0,925	0,925	τ_0
Sd_y					1,000	0,846	-0,823	-0,823	Sd_y
Sd_u						1,000	-0,707	-0,707	Sd_u
Sa_y							1,000	1,000	Sa_y
Sa_u								1,000	Sa_u

Observem valors de correlació 1 en Sa_y i Sa_u donat que s'assumeix comportament elastoplàstic i la relació entre l'acceleració espectral del punt yielding i últim tenen una dependència directa.

Tabla 11. Matriu de correlació entre propietats i desplaçament i acceleració espectral de la mostra [Font pròpia].

	f_m	E	G	τ_0	Sd_y	Sd_u	Sa_y	Sa_u	
f_m	1,000	0,906	0,823	0,906	-0,896	-0,767	0,873	0,873	f_m
E		1,000	0,882	0,821	-0,946	-0,765	0,793	0,793	E
G			1,000	0,737	-0,914	-0,705	0,710	0,710	G
τ_0				1,000	-0,845	-0,752	0,905	0,905	τ_0
Sd_y					1,000	0,850	-0,797	-0,797	Sd_y
Sd_u						1,000	-0,659	-0,659	Sd_u
Sa_y							1,000	1,000	Sa_y
Sa_u								1,000	Sa_u

10.6.2. Correlació pel mètode N2 entre les propietats físiques i els estats de dany i les seves probabilitats

Tabla 12. Taula de correlacions entre les propietats físiques i els estats de dany i les seves probabilitats per la població [Font pròpia].

	DS ₁	DS ₂	DS ₃	DS ₄	P DS ₁	P DS ₂	P DS ₃	P DS ₄	
f_m	-0,892	-0,892	-0,864	-0,774	-0,117	-0,085	-0,386	-0,786	f_m
E	-0,948	-0,948	-0,895	-0,781	-0,122	-0,172	-0,479	-0,790	E
G	-0,916	-0,916	-0,841	-0,712	-0,128	-0,241	-0,519	-0,716	G
τ₀	-0,856	-0,856	-0,835	-0,754	-0,133	-0,076	-0,365	-0,753	τ₀
Sd_y	1,000	1,000	0,956	0,846	0,040	0,139	0,448	0,834	Sd_y
Sd_u	0,846	0,846	0,965	1,000	0,021	-0,346	-0,044	0,960	Sd_u
Sa_y	-0,823	-0,823	-0,793	-0,707	0,049	-0,078	-0,345	-0,706	Sa_y
Sa_u	-0,823	-0,823	-0,793	-0,707	0,049	-0,078	-0,345	-0,706	Sa_u
DS₁	1,000	1,000	0,956	0,846	0,040	0,139	0,448	0,834	DS₁
DS₂		1,000	0,956	0,846	0,040	0,139	0,448	0,834	DS₂
DS₃			1,000	0,965	0,031	-0,121	0,197	0,937	DS₃
DS₄				1,000	0,021	-0,346	-0,044	0,960	DS₄
P DS₁					1,000	0,044	0,092	0,068	P DS₁
P DS₂						1,000	0,902	-0,386	P DS₂
P DS₃							1,000	-0,047	P DS₃
P DS₄								1,000	P DS₄

Tabla 13. Taula de correlacions entre les propietats físiques i els estats de dany i les seves probabilitats per la mostra [Font pròpia].

	DS ₁	DS ₂	DS ₃	DS ₄	P DS ₁	P DS ₂	P DS ₃	P DS ₄	
f_m	-0,896	-0,896	-0,859	-0,767	0,026	-0,152	-0,453	-0,778	f_m
E	-0,946	-0,946	-0,882	-0,765	0,053	-0,252	-0,552	-0,774	E
G	-0,914	-0,914	-0,833	-0,705	0,117	-0,320	-0,587	-0,707	G
τ₀	-0,845	-0,845	-0,826	-0,752	0,044	-0,113	-0,398	-0,742	τ₀
Sd_y	1,000	1,000	0,955	0,850	0,011	0,203	0,507	0,834	Sd_y
Sd_u	0,850	0,850	0,968	1,000	0,021	-0,281	0,019	0,952	Sd_u
Sa_y	-0,797	-0,797	-0,751	-0,659	-0,197	-0,109	-0,383	-0,684	Sa_y
Sa_u	-0,797	-0,797	-0,751	-0,659	-0,197	-0,109	-0,383	-0,684	Sa_u
DS₁	1,000	1,000	0,955	0,850	0,011	0,203	0,507	0,834	DS₁
DS₂		1,000	0,955	0,850	0,011	0,203	0,507	0,834	DS₂
DS₃			1,000	0,968	0,017	-0,061	0,253	0,933	DS₃
DS₄				1,000	0,021	-0,281	0,019	0,952	DS₄
P DS₁					1,000	-0,059	-0,086	-0,018	P DS₁
P DS₂						1,000	0,907	-0,327	P DS₂
P DS₃							1,000	0,022	P DS₃
P DS₄								1,000	P DS₄

11. Comparativa

11.1. Comparativa de les corbes de capacitat

Les propietats de les corbes de capacitat (Figures 26 i 29) i els seus espectres (Figures 26 i 28) de la població i la mostra varien degut a la disminució del nombre d'individus. Tot i que aquesta variació és mínima donat que es mantenen els paràmetres estadístics de les Taules 4 i 5 (mitjana, mediana i desviació estàndard) trobem lleugerament desplaçats el punt de fluència, el punt últim i el punt de màxim tallant basal. Per saber si aquesta variació és assumible i per tant poder afirmar que els resultats de la mostra representen bé a la població cal estudiar correlació entre totes les variables d'entrada i els resultats obtinguts.

De manera més visual es poden veure en els diagrames de dispersió que contenen els histogrames tant del punt de fluència com del punt últim. Aquests donen una idea a simple cop d'ull de la mitjana i la desviació que mostren els valors d'aquests dos punts. També podem comprovar com la distribució de la població és altament similar a la distribució de la mostra, ja que com hem esmentat abans, la mostra es tria de manera que representi adequadament la població amb una distribució el més similar possible.

11.2. Comparativa de les corbes bilineals

En la comparació de les corbes bilineals podem observar variacions entre població i mostra, però sobretot, entre els diferents mètodes.

El mètode de l'espectre de capacitat mostra una major dispersió del desplaçament espectral del punt últim (veure Figures 34 i 35), amb una mitjana de 8,75 cm per la població i 8,785 cm per a la mostra, i de l'acceleració espectral, amb una mitjana de 0,094 g per la població i la mostra (veure Taules 6 i 7), mentre que els altres mètodes mostren valors més similars (5,59 cm pel desplaçament espectral de població i mostra i 0,116 per a l'acceleració espectral de població i mostra). El punt últim màxim del mètode CSM és notablement superior en desplaçament espectral de població i mostra vers els que ofereixen els altres mètodes, i de la mateixa manera passa amb l'acceleració espectral. Aquest fet és d'esperar donat que com hem comentat, el mètode CSM està plantejat per a altres tipus d'estructures de formigó reforçat diferents a la nostra i per tant no és aplicable al nostre cas.

Pel que fa al punt de fluència, també s'observen variacions apreciables entre els valors entre el CSM i la resta de mètodes, però no son tant significants com les del punt últim.

11.3. Errors entre resultats de població i mostra

A continuació mostrem els percentatges d'error que es comet en triar la mostra. Aquest és l'error comès del valor del desplaçament dels punts de fluència i últim de la mostra respecte el valor que hauríem de tenir, és a dir, els valors de desplaçament de la població. Aquest errors es calculen mitjançant l'equació 31:

$$error_{punt}[\%] = \left| \frac{d_{punt_{població}} - d_{punt_{mostra}}}{d_{punt_{població}}} \right| \cdot 100 \quad (31)$$

Els valors en percentatge obtinguts per a cada mètode són els següents (Taula 14):

%error	Punt	Punt	Mitjana	Mediana	Desv.est.	Mín.
CSM	P. Fluència	0,14	0,21	0,98	0,00	8,20
	P. Últim	0,32	0,33	5,82	0,00	0,10
N2	P. Fluència	0,36	0,55	1,56	0,03	2,03
	P. Últim	0,15	0,03	4,25	0,00	6,08
EC8	P. Fluència	0,36	0,16	0,70	0,01	0,01
	P. Últim	0,15	0,03	4,25	0,00	6,08
10%-Fit	P. Fluència	0,47	0,00	0,84	0,00	1,62
	P. Últim	0,15	0,03	4,25	0,00	6,08

Tabla 14. Taula del percentatge d'error comes en el desplaçament espectral [Font pròpia].

Com podem observar, independentment del mètode, el percentatge d'error comès en seleccionar una mostra de 278 d'una població de 1000 models és mínim. Aquest error es dona amb l'interval de confiança seleccionat que és del 95%. Si es volgués més precisió en els resultats i per tant major confiança, el nombre d'individus de la mostra seria major. Com aquests errors són molt petits podem confirmar que la mostra seleccionada és adequada i fiable, de manera que no caldria augmentar-la i mantindríem l'objectiu d'agilitzar els càlculs.

11.4. Comparativa de les corbes de fragilitat

Les corbes de fragilitat de la població mostren la probabilitat de que es doni cada estat de dany en funció del desplaçament del sostre de l'edifici. Com és d'esperar, la gravetat del dany augmenta a mida que el desplaçament del sostre augmenta i la seva probabilitat també. Quan un determinat dany assoleix gairebé la probabilitat màxima, es comença a donar el següent estat de dany.

De manera més visual, s'observa a la Figura 45 les distribucions de les probabilitats individualment, donant-nos una idea de a partir de quin desplaçament es dona un estat de dany determinat i quins presenten unes desviacions superiors, que indiquen la presència de l'estat en un rang major de desplaçament.

Així doncs, veiem que l'estat DS_0 , l'estat de dany nul, es dona fins a gairebé els 2 cm de desplaçament, és a dir, que fins aquest punt no existeix dany l'edifici. D'altra banda, pel que fa al cas més desfavorable, el DS_4 que implica un dany estructural elevat i col·lapse total o proper al total, es dona a partir dels 1,79 cm de desplaçament, arribant al seu màxim als 8,35 cm (veure Taula 8).

El cas de la població és molt similar, donat que com ja hem comentat, la mostra ha de complir uns requisits que assegurin la màxima representació de la població (veure Taula 9).

11.5. Comparativa de les propietats i els espectres

Tant pel que fa la població com la mostra, donat als alts valors, les variables d'entrada, és a dir, les propietats materials, tenen una alta correlació amb els resultats obtinguts en la representació bilineal, el punt de fluència i últim, i amb els estats de dany i les seves probabilitats.

Observem a la Taula 8 que la variable de la població més influent pel que fa el desplaçament espectral, tant del punt de fluència com del punt últim, és el mòdul Young, mentre que la propietat que més influeix l'acceleració és l'esforç tallant. El cas de la mostra (veure Taula 9) és molt similar, amb l'excepció que l'esforç a compressió té una lleugera major influència pel que fa el desplaçament espectral del punt últim.

En general, la variable que menys en influeix en l'espectre és el mòdul de rigidesa, amb l'excepció, tant per la població com per la mostra, que la variable menys influent per l'espectre de desplaçament en el punt de fluència és l'esforç tallant.

En la matriu també es pot observar que els valors de correlació de les acceleracions espectrals dels dos punts són idèntiques de valor 1. Aquest fet és degut a que s'assumeix un comportament elastoplàstic a l'hora de la creació de la representació bilineal de les corbes.

11.6. Comparativa de les propietats amb els estats de dany i les seves probabilitats

Com podem observar a les Taules 10 i 11, el mòdul de Young continua sent la variable d'entrada més influent en els estats de dany tant a la població com a la mostra, i en general, l'esforç tallant el menys influent, tot i que pel que fa l'estat de dany DS_4 , la correlació del mòdul de rigidesa és lleugerament superior. Els estats de dany més relacionats amb les propietats físiques són el DS_1 i el DS_2 .

Com es pot veure, el valor de correlació del DS_4 amb els desplaçament espectral del punt últim és 1, degut a que aquest estat de dany es defineix exactament com el desplaçament últim com s'ha vist al punt 7.

Pel que fa a les probabilitats dels estats de dany, els valors de correlació més elevats els trobem al DS_4 , estant més influenciat pel mòdul de Young i menys pel mòdul de rigidesa. Tot i que en general les correlacions no són elevades, es pot deduir quines d'elles afecten de major manera a les probabilitats de cada estat. El fet de que no siguin elevades es deu a que existeixen moltes altes variables i operacions entremig per al càlcul d'aquestes probabilitats.

Conclusions

Aquest treball pretenia assolir dos objectius particulars: el primer determinar la suficiència i representació d'una mostra escollida de la població total de models i el segon determinar la influència ens els resultats de les diferents propietats mecàniques materials.

És important tenir en compte la variabilitat de les propietats mecàniques dels materials en aquest tipus d'edificis ja que per la seva època de construcció la variabilitat de les mateixes era molt elevada al ser elaborats de manera manual. La correcta selecció d'una mostra, amb un adequat nivell de confiança, així com una distribució similar a la de la població és important per a poder assegurar resultats adequats i propers als que s'obtindrien si s'utilitzés la mostra completa (Tabla 15). Per això és important fer la comparació de la esmentada adequació amb ests com el de Kolmogoro-Smirnov.

La selecció dels mètodes d'anàlisi és important. En aquest estudi s'han utilitzat diversos mètodes simplificats, els quals han estat desenvolupats i validats en diferents treballs per diferents tipologies constructives. La selecció del mètode N'' es fa en base a resultats obtinguts prèviament en tipologies similars. No obstant, s'hauria de realitzar comprovacions mitjançant metodologies més avançades com anàlisi dinàmics incrementals, IDA .[F. De Luca, 2011].

A continuació mostrem part de les taules 6 i 7 com a comparació dels resultats pel mètode N2 de la població i la mostra.

Tabla 15. Comparació del resultats de l'espectre de capactiat de població i mostra pel mètode N2 [Font pròpia].

NSP		Measurement	Point	mean	median	std	min	max
Població	N2	Spectral Displacement [cm]	Yielding	1,620	1,609	0,206	0,958	2,365
			Ultimate	5,590	5,540	0,688	1,786	8,352
		Spectral Acceleration [g]	Yielding	0,116	0,116	0,005	0,073	0,130
			Ultimate	0,116	0,116	0,005	0,073	0,130
Mostra	N2	Spectral Displacement [cm]	Yielding	1,626	1,618	0,203	0,958	2,317
			Ultimate	5,599	5,541	0,717	1,786	7,844
		Spectral acceleration [g]	Yielding	0,116	0,116	0,005	0,080	0,129
			Ultimate	0,116	0,116	0,005	0,080	0,129

Tabla 16. Errors comesos en seleccionar la mostra [Font pròpia].

%error	Punt	Punt	Mitjana	Mediana	Desv.est.	Mín.
N2	P. Fluència	0,36	0,55	1,56	0,03	2,03
	P. Últim	0,15	0,03	4,25	0	6,08

D'altra banda, pel que fa les propietats mecàniques l'objectiu era determinar la seva influència en els resultats i en cas de trobar propietats que no influïssin de manera significativa ens els resultats per tal d'excloure-la en generació de més models. Per això s'han estudiat amb l'espectre de capacitat (punt de fluència i últim) i els estats de dany, els quals depenen dels límits de desplaçament espectral. En aquest cas, com s'observa a la Taula 10, existeix una gran correlació entre elles i els desplaçament i acceleració del punt de fluència i el punt últim. També observem a la Taula 12 que totes elles es troben molt involucrades en els estats de dany de l'edifici, sobretot a l'estat DS₁ i DS₂, i també en la probabilitat de l'estat DS₄. Tot i que el mòdul de Young s'imposa lleugerament a la resta cap no és negligible.

Pel que fa a la continuació d'aquest estudi el següent pas seria realitzar estudis dinàmics per validar finalment tots els nostres resultats, prendre mostres amb més elements i veure la tendència o enfrontar la capacitat a la demanda i estudiar el punt de desenvolupament.

Anàlisi de l'impacte ambiental

En aquest apartat es pretén estudiar l'impacte ambiental generat per la realització d'aquest treball i aquelles activitats relacionades amb el mateix.

Donat que l'objecte d'estudi és l'edifici ja construït situat a la ciutat de Barcelona i no s'ha dut a terme cap mena d'intervenció en aquest, l'impacte ambiental generat no es basa en la modificació física de cap de les parts ni de la realització de proves de cap mena a l'edifici.

Donat l'esmentat anteriorment, analitzarem la despesa energètica únicament dels mitjans fets servir en l'elaboració d'aquest informe i les hores invertides ell. Com que l'entrega és digital i s'ha fet servir ús d'aplicacions a la xarxa pel traspàs d'informació amb el tutor no ha existit consum de paper però sí el consum dels dispositius electrònics. Tenint en compte el consum i el temps d'utilització de l'ordinador portàtil s'ha elaborat la següent taula amb la emissió de CO₂ corresponent (veure taula 17).

D'altra banda, la major empremta ocasionada ha estat la del transport utilitzat per assistir a les tutories o aules d'estudi. El consum de combustible comporta una alta emissió de CO₂ i és per això que ha estat considerat dins l'anàlisi ambiental tot i no ser, a priori, un aspecte explícit en la elaboració del treball.

Tabla 17. Taula del consum energètic i emissions produïdes tenint en compte l'ordinador i el vehicle utilitzats en concret [Font pròpia].

Consum energètic		
Ordinador portàtil MacBook Pro		
Consum	63,50 ¹	W
Temps d'utilització	360,00	h
Grams de CO ₂ /kWh	321,00 ²	gCO ₂ /kWh
Total	7.338,06	gCO₂
Vehicle Volkswagen Polo		
Kilòmetres recorreguts	483,00	Km
Grams de CO ₂ /kWh	109 ³	gCO ₂ /km
Total	52.647,00	gCO₂
Total	59.985,06	gCO₂

Així doncs, com podem veure a la taula 4, l'emissió total generada en la realització d'aquest treball és de 59.985,06 gCO₂.

¹ www.electrocalculator.com (21/12/2019)

² <https://canviclimatic.gencat.cat> (21/12/2019)

³ <https://www.km77.com> (21/12/2019)

Pressupost i Anàlisi Econòmica

Pel desenvolupament d'aquest treball no ha fet falta cap mena de despesa econòmica directe ja que degut a ser un treball acadèmic, les llicències dels programes utilitzats i altres recursos com articles han estat proporcionades per la institució de la universitat (Universitat Politècnica de Catalunya).

Tot i així, en cas d'haver de realitzar aquest estudi en una oficina tècnica, els honoraris, costos de llicències i altres despeses formarien part del pressupost. Tenint en compte la feina que ha implicat aquest treball i partint d'un recull de dades que ha estat proporcionat per un tercer, comptaríem amb les següents despeses (veure pressupost a la Taula 15):

- Honoraris d'enginyer: es consideraran uns honoraris de 20€ l'hora per un total de 360 hores que és el temps estipulat per a un TFG de 24 ECTS.
- Matlab: és necessària una llicència de 800€ anuals (IVA inclòs).
- Microsoft Office: es considera la llicència anul·la del 69,00€ (IVA inclòs).
- Matrícula universitària del TFG: es consideren 39,53€ el crèdit ECTS i 102,66€ el preu de serveis (impostos inclosos).

Tabla 18. Taula pressupost de la realització del treball [Font pròpia].

Pressupost					
Concepte	Quantitat		Preu		Subtotal
Honoraris d'enginyer	360	h	20,00	€/h	7.200,00€
Llicència Matlab	1	-	632,00	€/any	632,00€
Llicència Office	1	-	54,51	€/any	54,51€
Crèdits universitaris	24	crèdits	39,53	€/crèdit	948,72€
Costos de serveis	1	-	102,66	€	102,66€
			Subtotal	IVA (21%)	TOTAL
			8.988,38€	1.656,17€	10.644,55€

Bibliografia

- APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL. 1996. *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. Report No. SSC 96-01.
- AVILA-HARO, J.A.; GONZÁLEZ-DRIGO, R.; PUJADES, L.G.; BARBAT, A. 2017. *Probabilistic Seismic Damage Assessment of URM Buildings Based on Incremental Dynamic Analysis*. 16thWCEE, Santiago de Chile.
- BAKER, J.W. 2015. *Efficiency Analytical Fragility Function Fitting Using Dynamic Structural Analysis Earthquake Spectra*, 31 (1), 579-599.
- BONETT, R.L. 2003. *Vulnerabilidad y Riesgos Sísmicos de Edificios. Aplicación a Entornos Urbanos en Zonas de Amenaza Alta y Moderada*. Dpto. De Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. UPC, Barcelona.
- BONETT, R.; BARBAT, A.H.; PUJADES, LL. 2004. *Curvas de Fragilidad Sísmica para Edificios Tradicionales de Mampostería No Reforzada de Barcelona, España*. UPC, Barcelona.
- COGOLLO, M; ROGRÍGUEZ, I; VERBEL, I.A. *Plan Cerdá*. Universiadd del Norte, Barranquilla. 2015.
- CORNADÓ, C. 2015. *Comportament Mecànic-Estructural dels Edificis Històrics de Murs d'Obra de Fàbrica de Maó de l'Eixample de Barcelona*. UPC, Barcelona.
- DE LUCA, F.; VAMVATSIKOS, D.; IERVOLINO, I. 2011. *Near-Optimal Bilinear Fit of Capacity Curves for Equivalent SDOF Analysis*. 3rd ECCOMAS Thematic Conference. Corfu.
- FAJFAR, P. 1996. *A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Desing*. Earthquake Spectra, Vol.16, No.3, pp.573-592.
- FISHINGER, M.; FEJFAR, P. CAPUDER, F.C. 1987. *Earthquake Resistance of the SCT Large Panel Buildings System*.
- FREEMAN, S.A.; NICOLETTI, J.P.; TYRELL, J.V. 1975. *Evaluations of Existing Buildings for Seismic Risk – A Case*

Study of Puget Sound Naval Shipyard. Proceedings of the U.S National Conference on Earthquake Engineers EERI, pp 113-122, Berkley.

GONZALEZ-DRIGO, R.; AVILA-HARO, J.; PUJADES, L.G.; BARBAT, A.H. 2016. *Non-linear Static Procedures Applied to High-Rise Residential URM buildings.* Dept. of Structural Engineering, Barcelona.

HENDRY, A.W.; SINHA, B.P.; DAVIES, S.R. 1990. *Design of Masonry Structures.* Department of Civil Engineering University of Edinburgh, UK.

ICGC, Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. Generalitat de Catalunya.

IDESCAT, Institut d'Estadística de Catalunya. Generalitat de Catalunya. idescat.cat . Data de consulta: 17/11/2019.

LAGOMARSINO, S.; GALASCO, A.; PENNA, A.; CATTARI, S. 2008. *TREMURI: Seismic Analysis Program for 3D Masonry Buildings.* University of Genova. Genova.

MÁCA, J.; AVILA-HARO, J.A. 2015. *A Comparasion Between Methodologies in the Seismic Assessment of Buildings.* 13th Interntional Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings. Faculty of Civil Engineering STU, Bratislava.

MILUTINOVIC, Z.V.; TRENDAFILOSKI, Q.S. 2003. *WP4: VULNERABILITY OF CURRENT BUILDINGS.* RISK-UE Project Handbook.

MUÑOZ, F. 2009. *La Razón de la Ciudad: El Plan Cerdá.* Metropolis, No. 76.

MORENO, R. 2006. *Evaluación del Riesgo Sísmico en Edificios Mediante Análisis Estático No Lineal: Aplicación a Diversos Escenarios Sísmicos de Barcelona.* UPC, Barcelona.

MORENO, R.; PENNA, A. 2003. *Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica de Estructuras de Mampostería No Reforzada. Aplicación a un Edificio de la Zona del Eixample en Barcelona.* Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras, Vol. 8, N. 2, 91 – 120. Barcelona.

NCSE-02. 2009. *Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación.* Ministerio de Fomento, Gobierno de España.

PARICIO, A. 2001. *Secrets d'un Sistema Constructiu*. EDICIONS UPC. URI:

<http://hdl.handle.net/2099.3/36310>

PUJADES, L.G.; BARBAT, A.H.; GONZÁLEZ-DRIGO, R.; AVILA, J.; LAGOMARSINO, S. 2010. *Seismic*

Performance of a Block of Buildings Representative of the Typical Construction on the Eixample District in Barcelona. UPC, Barcelona.

SERRATOSA, A. 1994. *El Valor de l'Eixample de Cerdà, avui*. Cerdà. Urbs i Territori. Una Visió de Futur.

Barcelona.

SIFÓN, M. 2016. *Aplicación del CSM al Diseño Sísmico Prestacional de Estructuras Aporticadas de*

Hormigón Armado. Comparación de los Métodos FEMA EL y N2. Universitat Politècnica de València. URI: <http://hdl.handle.net/10251/77046>

SISMICAT. 2014. *Pla Especial 'Emergències Sísmiques a Catalunya*. Direcció General de Protecció Civil.

Departament d'Interior. Generalitat de Catalunya.

TARRAGÓ, S. 1994. *El Valor de l'Eixample de Cerdà, avui*. Cerdà. Urbs i Territori. Una Visió de Futur.

Barcelona.

VARGAS, Y.F.; PUJADES, L.G.; BARBAT, A.H.; HURTADO, J.E. 2013. *Evaluación Probabilista de la*

Capacidad, Fragilidad y Daño Sísmico de Edificios de Hormigón Armado. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. UPC.